



HAL
open science

Énergie marine renouvelable : caractérisation des ressources hydrocinétiques en Manche et étude d'impact de la turbulence sur l'efficacité de systèmes de récupération d'énergie tidale

Maxime Thiébaud

► To cite this version:

Maxime Thiébaud. Énergie marine renouvelable : caractérisation des ressources hydrocinétiques en Manche et étude d'impact de la turbulence sur l'efficacité de systèmes de récupération d'énergie tidale. Hydrologie. Université du Littoral Côte d'Opale, 2017. Français. NNT : 2017DUNK0457 . tel-01713201

HAL Id: tel-01713201

<https://theses.hal.science/tel-01713201v1>

Submitted on 20 Feb 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ÉNERGIE MARINE RENOUVELABLE : CARACTÉRISATION DES RESSOURCES
HYDROCINÉTIQUES EN MANCHE ET ÉTUDE D'IMPACT DE LA TURBULENCE SUR
L'EFFICACITÉ DE SYSTÈMES DE RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE TIDALE

THÈSE DE DOCTORAT

présentée par :

MAXIME THIÉBAUT

pour obtenir le grade de Docteur

ÉCOLE DOCTORALE- SCIENCES DE LA MATIÈRE, DU RAYONNEMENT ET DE
L'ENVIRONNEMENT

Discipline : Géosciences, Écologie, Paléontologie, Océanographie.

Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, UMR 8187, CNRS,

Université du Littoral Côte d'Opale, Université de Lille

5 Octobre 2017



Thèse supervisée par :

Alexei Sentchev

François G. Schmitt

Professeur, Université du Littoral Côte d'Opale

Directeur de recherche, CNRS

Jury :

Philippe Fraunié

Élie Rivoalen

Gregorio Iglesias

Luminita Danaila

Grégory Pinon

Professeur, Université de Toulon

Professeur, INSA Rouen

Professeur, Plymouth University

Professeur, Université de Rouen

Maître de Conférences, Université du Havre

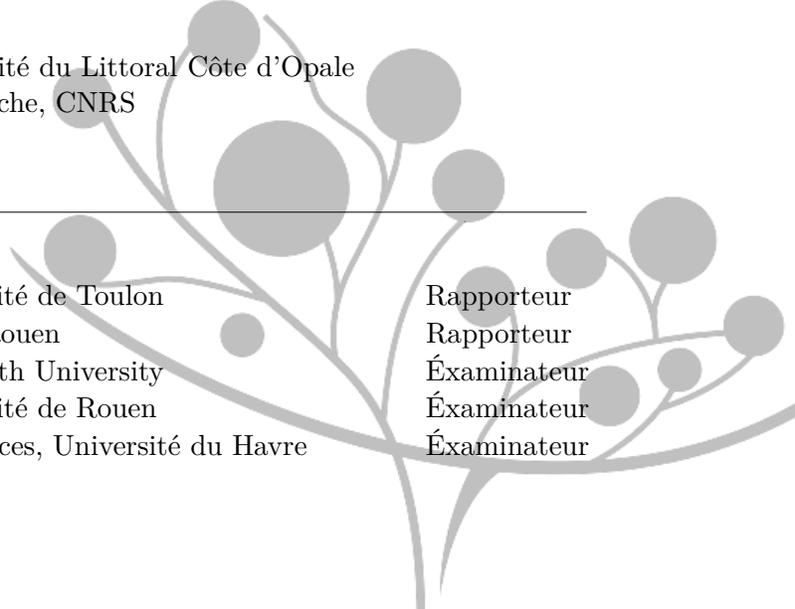
Rapporteur

Rapporteur

Examinateur

Examinateur

Examinateur



Énergie Marine Renouvelable : Caractérisation des ressources hydrocinétiques en Manche
et étude d'impact de la turbulence sur l'efficacité de systèmes de récupération d'énergie
tidale

© COPYRIGHT

5 Octobre 2017

Maxime Thiébaud

*« Le bonheur est salubre pour les corps,
mais c'est le chagrin qui développe les forces de l'esprit. »*

Marcel Proust - À la recherche du temps perdu

REMERCIEMENTS

Cette thèse, cofinancée par le projet européen Pro-Tide INTERREG IVB et le Pôle Métropolitain de la Côte d'Opale, a été effectuée au Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences - UMR 8187 CNRS de Wimereux.

J'adresse mes sincères remerciements à celles et ceux, qui de près ou de loin, m'ont soutenu et encouragé pendant ces trois années de thèse. J'aime à croire que chacun d'entre eux se reconnaîtra dans ces quelques mots.



RÉSUMÉ

Malgré l'intérêt suscité, l'exploitation de l'énergie hydrolienne accuse toujours un sérieux retard par rapport à d'autres ressources renouvelables. Ce développement tardif s'explique d'une part par l'absence d'une méthodologie pertinente de quantification du potentiel hydrocinétique, d'autre part, par le milieu marin, jugé hostile, au sein duquel des phénomènes turbulents, appliquent des contraintes sur la structure des hydroliennes. Offrant une vision précise de l'écoulement et de son hétérogénéité spatiale et temporelle, la courantographie radar, présentée dans la première partie de cette thèse, constitue un outil puissant d'analyse de la dynamique de marée. Inédite dans le domaine des énergies marines renouvelables, elle offre une alternative probante à la modélisation numérique, souvent privilégiée bien que générant des résultats contestables compte tenu de sa conceptualisation simpliste des phénomènes réels. L'étude d'impact d'un écoulement turbulent pleinement développé sur la performance énergétique de prototypes d'hydroliennes de type Darrieus constitue la seconde partie de cette thèse. L'analyse spectrale des signaux temporels de vitesse de courant a permis de révéler les propriétés scalaires de l'écoulement. La caractérisation multi-échelle a montré que l'écoulement est animé par un processus dynamique de brisures successives des structures fluides imbriquées de taille allant de l'échelle d'injection à l'échelle de diffusion moléculaire. Enfin, le partitionnement en échelles dynamiques de la turbulence des spectres de vitesse et de puissance générée par l'hydrolienne a mis en évidence une certaine similarité entre la taille des structures tourbillonnaires qui régissent l'écoulement et les dimensions de la turbine.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	v
Résumé	vii
Liste des tableaux	xv
Table des figuresxxxiii
Préfacexxxv
Introduction Générale	1
0.1 Ressources énergétiques de l'environnement marin	3
0.2 Définitions et ordres de grandeurs relatives aux énergies marines	7
0.3 Etat de l'art de la technologie hydrolienne	9
0.3.1 Concepts de base	9
0.3.2 Avantages et inconvénients	11
0.4 Potentiel hydrocinétique et état des lieux de l'exploitation hydrolienne en France	13
0.5 Contexte et plan de thèse	15
I Estimation du potentiel hydrocinétique en Manche - Nord du Golf de Gas- cogne	19
1 Méthodologie de quantification du potentiel hydrocinétique	21
1.1 Introduction	21
1.2 La courantométrie radar	24

1.2.1	Applications de la courantographie radar	24
1.2.2	Mesure des courants superficiels : principe de fonctionnement	25
1.2.3	Systèmes WERA et COSMER	27
1.2.4	Prétraitement et méthodes d'interpolation	28
1.2.5	Méthode d'interpolation 2dVar	31
1.3	Utilisation de courantomètres acoustiques pour la détermination du profil vertical de vitesse	34
1.4	Méthodologie de quantification d'énergie tidale	37
1.4.1	Force de courant, asymétrie des vitesses et de direction de courant	38
1.4.2	Profil vertical de vitesse	41
1.4.3	Ressource hydrocinétique	43
2	Estimation du potentiel hydrocinétique par télédétection des courants et mesures in-situ	49
2.1	Introduction	49
2.2	Estimation du potentiel en mer d'Iroise	51
2.2.1	Description du site	51
2.2.2	Systèmes d'observations des courants de marée	52
2.2.3	Résultats	55
2.3	Estimation du potentiel dans le Déroit du Pas-de-Calais	83
2.3.1	Site d'étude, conditions et contraintes environnementales	83
2.3.2	Systèmes d'observations des courants de marée	86
2.3.3	Résultats	88
2.4	Conclusions	103
3	Étude de la circulation de marée au large du port de Douvres et de Yarmouth, au sud de l'Angleterre	109
3.1	Introduction	109

3.2	Méthodologie expérimentale	111
3.3	Étude de la circulation de marée au large du port de Yarmouth	113
3.3.1	Contexte de l'étude	113
3.3.2	Site d'étude	115
3.3.3	Cadre expérimental	117
3.3.4	Résultats	119
3.3.5	Recommandations	125
3.4	Étude de la circulation de marée au large du port de Douvres	126
3.4.1	Contexte de l'étude	126
3.4.2	Résultats	130
3.5	Analyse et recommandations	137
3.6	Conclusions	137
 II Étude de l'impact de la turbulence sur l'efficacité de systèmes de récupération d'énergie tidale		141
4	Aspects théoriques et méthodologie expérimentale	143
4.1	Introduction	143
4.2	La turbulence développée	145
4.2.1	Aspects théoriques	145
4.2.2	Mesures de la turbulence en milieu marin	153
4.2.3	Ordre de grandeurs des paramètres turbulents en milieu marin . . .	155
4.3	Méthodologie, cadre expérimental	157
4.3.1	Présentation du site	157
4.3.2	Sélection du meilleur site de test de prototypes d'hydroliennes . . .	158
4.3.3	Site de Temse	160
4.3.4	Mesures ADV et ADCP	161

4.4	Prototypes d'hydroliennes	163
4.4.1	Water2Energy	163
4.4.2	Blue Energy Canada	166
4.5	Évaluation du coefficient de puissance et de couple	167
4.6	Analyse spectrale de signaux stochastiques	168
4.6.1	Statistique d'ordre 2	170
4.6.2	Stationnarité et ergodisme	170
4.6.3	Densité spectrale de puissance	172
4.6.4	Fonction de cohérence	173
5	Évaluation de la performance d'hydroliennes dans un écoulement turbulent de marée	175
5.1	Introduction	175
5.2	Dynamique de marée dans l'estuaire, vitesse d'agitation et taux de turbulence	176
5.3	Propriétés scalaires de l'écoulement et caractérisation multi-échelle	181
5.4	Estimation de la performance des prototypes d'hydroliennes	185
5.4.1	Hydrolienne BEC	185
5.4.2	Hydrolienne W2E	189
5.5	Analyse de la production de puissance et mise en relation avec la turbulence	192
5.6	Conclusions	198
	Conclusion Générale	201
	Bibliographie	209

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 0.1 : Puissance électrique nominale et annuelle de différentes installations de production d'énergie.	8
TABLEAU 2.1 : Valeurs du coefficient α obtenus par approximation des profils de vitesse pour trois périodes spécifiques autour du pic de vitesse (Pic vel.), pour les phases de flot, de jusant, de vive-eau (V.E.) et de morte-eau (M.E.) dans le passage du Fromveur (Fromv.) et pour les deux emplacements de grandes profondeurs (Offs.).	70
TABLEAU 2.2 : Estimation de la densité de puissance cinétique (kW/m^2) en 4 points (A, B, B _n et B _s) autour de l'île d'Ouessant, moyennée au cours de différentes phases de marée, dans la couche supérieure de la colonne d'eau.	75
TABLEAU 2.3 : Valeurs moyennes annuelles de la puissance théorique et technique exploitable estimées dans la couche supérieure et inférieure de la colonne d'eau en deux emplacements : le nord-ouest de l'île d'Ouessant (point A) et le centre du passage du Fromveur (point B).	80
TABLEAU 2.4 : Coefficient α résultant de l'approximation des profils de vitesse par une loi de puissance, au cours du trois périodes spécifiques autour du pic de vitesse, en flot et en jusant. L'écart-type $\Delta\alpha$ est estimé en considérant les profils moyennés sur 20 minutes à partir des mesures ADCP et du modèle.	96

TABLEAU 2.5 : Erreur relative ε (%) résultant de l'approximation des profils de vitesse ADCP par la loi de puissance $V(z)$ pour 4 valeurs de coefficient de rugosité $z_0 = 0,2; 0,3; 0,4;$ et $0,5$ mm, au cours des trois périodes autour du pic de vitesse.	98
TABLEAU 2.6 : Valeurs moyennes mensuelles de la puissance théorique $\langle P_{th} \rangle$ et techniquement exploitable $\langle P_{exp} \rangle$ estimées dans la couche supérieure et inférieure de la colonne d'eau au centre du passage du Fromveur et au nord-ouest de l'île d'Ouessant et dans toute la colonne à 6 km à l'ouest du Cap Gris-Nez.	106
TABLEAU 3.1 : Heure de marée de basse mer (BM) et de pleine mer (PM) lors des deux jours de manipulation au large du port de Yarmouth. Le coefficient de marée pour chaque jour est également indiqué.	117
TABLEAU 3.2 : Horaires et durée de chaque sortie effectuée au large du port de Yarmouth. L'heure à mi-parcours est également indiquée, en considérant l'heure de basse mer (BM) et de pleine mer (PM) comme référence pour les sorties en juillet et octobre 2015 respectivement. Le nombre de points de mesures de vitesse après la moyenne sur 30 secondes est mentionné dans la dernière colonne.	119
TABLEAU 3.3 : Heure de marée de basse mer (BM) et de pleine mer (PM) lors des trois jours de manipulation au large du port de Douvres. Le coefficient de marée pour chaque jour est également indiqué.	129
TABLEAU 3.4 : Horaires et durée de chaque sortie effectuée au large du port de Douvres. L'heure à mi-parcours est également indiquée, en considérant l'heure de basse mer comme référence. Le nombre de points de mesures de vitesse après la moyenne sur 30 secondes est mentionné dans la dernière colonne.	131

TABLEAU 5.1 : Propriétés principales de l'écoulement turbulent pour différents stades de marée identifiés sur la Fig. 5.4a.	179
TABLEAU 5.2 : Propriétés scalaires de l'écoulement estimées au cours de trois périodes successives d'un cycle de marée dans l'Escaut.	184

TABLE DES FIGURES

FIGURE 0.1 :	Maturité des énergies marines, d’après France Energies Marines. .	6
FIGURE 0.2 :	Représentation schématique d’hydroliennes à axe horizontal (haut) et vertical (bas) (extrait de Edenhofer et al., 2011).	10
FIGURE 0.3 :	Éolienne Haliade 150 d’Alstom (gauche) et hydrolienne HS 1000 d’Hammerfest Ström (droite). Les deux systèmes de récupération d’énergie sont à axe horizontal. Sources : www.alstom.com et www.hammerfeststrom.com	11
FIGURE 0.4 :	Éolienne du laboratoire Sandia (gauche) et hydrolienne (en po- sition de maintenance) de la société Instream Energy Systems (droite) à axe vertical. Sources : www.energy.sandia.gov et www.instreamenergy.com	12
FIGURE 0.5 :	Hydrolienne MCT SeaGen immergée dans le Strangford Loch en Irlande du Nord. Source : www.marineturbines.com	13
FIGURE 0.6 :	Emplacements des sites propices à l’exploitation de l’énergie hy- drolienne en Europe. Source : www.aquaret.com	14
FIGURE 0.7 :	Hydrolienne Sabella D10 installé dans le passage du Fromveur. Source : www.sabella.fr	15
FIGURE 1.1 :	Vecteurs de courant obtenus lors d’une étude sur la circulation de marée au sud du port de Douvres. Le tourbillon apparent est la conséquence de la renverse de courant et illustre bien la difficulté d’interprétation des résultats d’une courantographie par ADCP due à l’évolution temporelle de la marée.	23

FIGURE 1.2 :	Exemple de spectre Doppler rétrodiffusé par la surface de la mer en direction du radar (extrait de Paduan et Washburn, 2013). Les positions des fréquences de Bragg théoriques ($\pm f_b$) sont indiquées par les lignes en trait rompu. Les quantités Δf correspondent au décalage entre les positions mesurées et théoriques des raies.	26
FIGURE 1.3 :	Vecteurs de courant (flèches bleues) obtenus par combinaison des vitesses radiales mesurées par des réseaux radars déployés sur deux sites.	28
FIGURE 1.4 :	Carte des composantes radiales de courant obtenue après traitement par la méthode MUSIC. Les mesures de vitesse radiales ont été réalisées à partir d'un radar HF installé à Garchine.	30
FIGURE 1.5 :	ADCP déployé en position « tête » vers le haut sur le fond marin. Source www.teledynemarine.com	34
FIGURE 1.6 :	Schéma d'un ADCP tracté par un bateau naviguant à une vitesse V_B . Les quatre faisceaux acoustiques émis par les transducteurs sont également représentés. L'ouverture des faisceaux est définie par l'angle $\beta = 20^\circ$	35
FIGURE 1.7 :	Schéma de la géométrie d'un ADCP RDI installé sur le fond marin. Seuls les faisceaux n°3 et n°4 sont représentés. L'angle $\phi = 30^\circ$ est l'angle d'émission des transducteurs. L'ouverture des faisceaux est définie par l'angle $\beta = 20^\circ$	36

- FIGURE 1.8 : Principe de la mesure de la vitesse d'une particule contenue dans l'écoulement par effet Doppler. L'onde incidente de fréquence ν_0 émise par le transducteur est rétrodiffusée à la fréquence ν_1 par une particule en mouvement (cercle noir). La particule est caractérisée par une vitesse V , faisant un angle α avec l'axe central du transducteur (ligne en pointillé). La vitesse radiale v_r , mesurée par effet Doppler, est la projection de V le long de l'axe central du transducteur. 38
- FIGURE 1.9 : Évolution de la vitesse de courant de surface mesurée par radar au sud du passage du Fromveur, en mer d'Iroise. Les couleurs bleu et rouge distinguent les vitesses de jusant et de flot respectivement. 39
- FIGURE 1.10 : Nuage de points obtenu à partir des vitesses de courant mesurées par radar au sud du passage du Fromveur. Les points bleus et rouges distinguent les vitesses de jusant et de flot respectivement. La vitesse moyenne pour chacune de ces phases de marée est représentée par un cercle et un rond noir respectivement. Seules les vitesses supérieures à 0,5 m/s sont représentées. Les traits noirs indiquent la direction du courant dominant pour les phases de jusant et de flot. Le décalage entre ces deux directions est déterminé grâce à la quantité $\Delta\theta$ 40
- FIGURE 1.11 : Profils verticaux de vitesses obtenus par l'EMEC à partir de l'équation 1.20. Source : [Legrand \(2009\)](#). 43

FIGURE 1.12 : Évolution de la courbe de puissance de l'hydrolienne MCT Seagen (www.marineturbines.com) en fonction de la vitesse de courant. Les cercles rouges et les croix bleus représentent les valeurs de puissances générées pendant le flot et le jusant respectivement. La puissance moyenne des deux phases de marée est affichée en trait noir continu.	45
FIGURE 1.13 : Exemple d'une distribution de vitesse du vent approximée par une densité de probabilité de Weibull (courbe rouge). Source : green-power.com.pl	46
FIGURE 2.1 : Domaine d'étude en mer d'Iroise avec la couverture radar (fond et pointillé gris) et leur emplacement (cercles gris). Les triangles rouge, bleu et vert indiquent la position des ADCPs dans le passage du Fromveur, à l'ouest de l'île d'Ouessant et à la périphérie sud de la zone d'étude respectivement. L'intervalle du contour de bathymétrie est de 50 m (lignes noires). Les noms géographiques utilisés dans le texte sont également mentionnés.	52
FIGURE 2.2 : Réseau de réception de 16 antennes installé au cap Garchine. Source : www.actimar.fr	53
FIGURE 2.3 : Ellipses de courant en période de vive-eau. Une ellipse sur quatre est représentée. Les ellipses rouges et bleus indiquent la sens de rotation du courant dans le sens direct et indirect respectivement.	56
FIGURE 2.4 : Amplitude et direction du courant dominant de flot (rouge) et de jusant (bleu) au cours d'une période de vive-eau. La vitesse maximale en surface pendant la période d'étude est indiquée par le code couleur, les vitesses moyennes annuelles sont indiquées par les contours blancs. Les lettres A et B montrent les points de grille où les courants les plus forts sont observés.	57

FIGURE 2.5 : Asymétrie de la direction du courant dominant $\Delta\theta$ entre les phases de flot et de jusant.	59
FIGURE 2.6 : Occurrences de vitesse pour les valeurs : 1 m/s (a); 1,5 m/s (b) et 2 m/s (c).	60
FIGURE 2.7 : Densité de probabilité des vitesses enregistrées en deux points où les vitesses maximales ont été observées : point A (a) et B (b). Les occurrences cumulées de vitesse du point A sont représentées en (c). La distribution des occurrences cumulées est approximée aux points A et B par la fonction de répartition de Weibull (courbe rouge et bleu). Les paramètres k et λ sont donnés dans le texte. La courbe en pointillé sur la figure (a) représente l'approximation de Weibull au point A.	61
FIGURE 2.8 : Distribution spatiale de l'asymétrie a des vitesses de courant. Les croix noires indiquent la position des points de grille sélectionnés pour une analyse détaillée.	62
FIGURE 2.9 : Évolution temporelle de l'amplitude de courant en deux points de grille à proximité du centre du Fromveur : emplacements 3 (noir) et 5 (gris). La position des points de grille est représentée par les croix noires sur la Fig. 2.8. La valeur d'asymétrie des deux emplacements est indiquée. Les lignes rouges et bleus montrent la position des pics de vitesse observés en flot et en jusant respectivement.	63
FIGURE 2.10 : Spectre de l'énergie cinétique obtenu sur la période avril-mai 2007 à partir des vitesses radars (extrait de Sentchev et al., 2013). Les nombres représentent les périodes dominantes de la marée (en jours). La barre d'erreur indique un intervalle de confiance de 95%.	65

- FIGURE 2.11 : Évolution de l'asymétrie a des vitesses de courant (a) et de la relation de phase γ entre les ondes de marée M_2 et M_4 (b) le long du passage du Fromveur. Les points rouges et bleus indiquent les sites où la marée est dominée par le flot et le jusant respectivement. Les points verts montrent les emplacements où les courbes de vitesse sont quasiment équilibrées ($a \simeq 1$). 66
- FIGURE 2.12 : Distribution spatiale du courant résiduel autour de l'île d'Ouessant. 68
- FIGURE 2.13 : Profils verticaux de vitesse de courant correspondant aux phases de vive-eau/morte-eau (a-b) et flot/jusant (c-d), obtenus à partir des mesures ADCP effectuées dans le centre du passage du Fromveur. Les profils de l'écoulement de flot et de jusant, provenant des mesures ADCP de 2006 et 2007 sont montrés en (e-f) et (g-h) respectivement. Les profils moyens au cours de la période du pic de vitesse sont représentés en rouge ceux obtenus une heure avant et après le pic de vitesse sont représentés en vert et bleu respectivement. Les profils obtenus deux heures avant et après le pic de vitesse sont tracés en pointillé. Les profils initiaux (moyennés sur 20 minutes) sont tracés en violet. L'extrapolation de l'évolution de la vitesse dans la couche de surface est représentée en gris. 69
- FIGURE 2.14 : Exemple de diagramme log-log obtenu lors de l'approximation du profil vertical de vitesse mesuré par ADCP pendant la phase de flot, dans le passage du Fromveur. Les vitesses observées sont représentées par des cercles noirs, et les vitesses approximées, par des cercles gris. 70

- FIGURE 2.15 : Évolution de la vitesse moyenne dans la colonne d'eau obtenue par ADCP (gris) et de la vitesse de surface enregistrée par radars (noir) sur deux sites d'installation ADCP : au centre du Fromveur (a) et à l'extrémité sud de la zone d'étude (b). La période en (a) a été limitée à 12 jours pour la clarté de la présentation. 71
- FIGURE 2.16 : Nuage de points des vitesses moyennées sur la verticale et des vitesses de surface obtenues au sud de la zone d'étude (a) et dans le Fromveur (b). Chaque point représente une valeur de vitesse moyennée sur une période de 20 minutes. La droite rouge montre la meilleure approximation linéaire de la dispersion des points et la ligne grise représente d'égalité. r est le coefficient de corrélation. 72
- FIGURE 2.17 : Distribution spatiale de la densité de puissance cinétique moyenne (contours blancs) et maximale (code couleur) de l'écoulement disponible dans la couche supérieure (a) et inférieure (b) de la colonne d'eau. Les croix indiquent la position de points de grille ayant fait l'objet d'une étude détaillée. 74
- FIGURE 2.18 : Évolutions horaires et journalières de la densité de puissance cinétique au cours d'une journée (a-c) et d'un mois (b-d) aux points A (a-b) et B (c-d) dans la couche supérieure (gris) et inférieure (noir) de la colonne d'eau. 76
- FIGURE 2.19 : Occurrences cumulées de la densité de puissance cinétique calculées au cours d'une année aux points A et B dans la couche supérieure (a) et inférieure (b) de la colonne d'eau. 77
- FIGURE 2.20 : Évolution temporelle de la densité de puissance cinétique disponible aux points B_n (bleu) et B_s (rouge). La somme des deux est représentée en gris. 78

- FIGURE 2.21 : Position du système MCT Seagen opérant dans la couche supérieure et inférieure de la colonne d'eau au nord-ouest de l'île d'Ouessant et au centre du passage du Fromveur. Le profil vertical de vitesse a été généré en considérant la loi de puissance déduite de l'étude statistique des données ADCP. 79
- FIGURE 2.22 : Évolution de la puissance théorique P_{th} (gris) et techniquement exploitable P_{exp} (noir) généré par un système MCT Seagen sur la base d'une moyenne journalière, pendant une période d'un mois au nord-ouest de l'île d'Ouessant (A) (a-b) et dans le passage du Fromveur (B) (c-d), dans la couche supérieure et inférieure de la colonne d'eau. 81
- FIGURE 2.23 : Configuration du réseau de 20 hydroliennes MCT Seagen installé au nord-ouest de l'île d'Ouessant et au centre du passage du Fromveur sur une superficie de 1 km². L'écart latéral entre chaque dispositif a été fixé à 60 m et celui entre les deux rangées, à 500 m. 82
- FIGURE 2.24 : Domaine d'étude : le détroit du Pas-de-Calais en Manche (rectangle rouge sur le panneau de droite). Les sites radars sont indiqués par les points noirs. Les triangles bleu et rouge montrent l'emplacement des ADCPs installés en juin 2008 et juillet 2009 respectivement. Les croix noires montrent les sites A et B, sélectionnés pour une analyse détaillée. La voie de navigation des navires commerciaux est représentée en marron, celle en bleu représente la zone de pêche. La bathymétrie est représentée par les contours gris clair avec le pas de 10 m. Le contour en trait noir hachuré indique la zone de couverture radars. Les noms géographiques mentionnés dans le texte, apparaissent également. 84

FIGURE 2.25 : Réseau de réception de 8 antennes, installé au cap Griz-Nez en avril-mai 2003.	87
FIGURE 2.26 : Vitesse moyenne des courants de surface (code couleur) mesurés par radars en avril-mai 2003 et vitesse moyenne des courants de vive-eau (contours blancs). Les ellipses de courant obtenues le 16 mai en période de vive-eau sont également représentées (une ellipse sur trois est montrée). Les ellipses noires et blanches indiquent que le vecteur courant est orienté dans le sens direct et indirect respectivement. Les croix noires montrent les emplacements des sites sélectionnés pour une analyse détaillée.	89
FIGURE 2.27 : Occurrences de vitesse pour les valeurs : 1 m/s (a) et 1,5 m/s (b).	90
FIGURE 2.28 : Distribution cumulative des occurrences de vitesse sur les sites A et B. Les lignes en pointillé représentent les vitesses moyennes calculées sur chaque emplacement.	91
FIGURE 2.29 : Distribution spatiale de l'asymétrie a des vitesses de courant.	92
FIGURE 2.30 : Distribution spatiale de l'asymétrie $\Delta\theta$ entre la direction du courant dominant de flot et de jusant.	93
FIGURE 2.31 : Profils verticaux de vitesse de courant obtenus en flot (a-c) et jusant (b-d), à partir des mesures ADCP effectuées en 2008 (a-b) et 2009 (c-d) au large de Boulogne/mer. Les profils moyens au cours de la période du pic de vitesse sont représentés en rouge ceux obtenus une heure avant et après le pic de vitesse sont représentés en vert et bleu respectivement. Les profils initiaux (moyennés sur 20 minutes) sont tracés en violet. Les profils en trait plein proviennent de l'analyse des vitesses observées, ceux en pointillé résultent du modèle numérique. L'extrapolation de l'évolution de la vitesse dans la couche de surface est représentée en gris.	94

FIGURE 2.32 : Variabilité temporelle sur toute la colonne d'eau de la composante zonale u et méridionale v de vitesse dérivant des observations ADCP et du modèle numérique, au cours d'une semaine, en juin 2009. La courbe grise représente la limite supérieure des mesures ADCP. La dernière fenêtre montre l'évolution temporelle de la vitesse v , moyennée sur la verticale, obtenue par ADCP (gris) et par le modèle (noir).	95
FIGURE 2.33 : Occurrences cumulatives des vitesses mesurées (noir) et modélisées (gris) à l'emplacement de l'ADCP déployé en juin 2009 (triangle rouge sur la Fig. 2.24). Les lignes en pointillé gris et noirs indiquent les vitesses moyennes.	97
FIGURE 2.34 : Densité de puissance cinétique $\langle P \rangle$ moyenne (code couleur) et maximale (contour blanc) de l'écoulement, disponible dans la couche supérieure (a) et inférieure (b). Les croix indiquent la position de points de grille ayant fait l'objet d'une étude détaillée.	100
FIGURE 2.35 : Évolutions horaires et journalières de la densité de puissance cinétique au cours d'une journée (a) et d'un mois (b) dans la couche supérieure, aux points A (gris) et B (noir).	101
FIGURE 2.36 : Profils verticaux moyens de la puissance cinétique disponible sur le site A, en flot et en jusant, obtenus à partir de la loi de puissance en $1/6^{\text{ème}}$ et $1/7^{\text{ème}}$ respectivement. Les courbes en pointillé montrent les profils moyens provenant des lois en $1/5^{\text{ème}}$ et $1/7^{\text{ème}}$ ($\pm \Delta\alpha$).	102
FIGURE 2.37 : Position du système MCT Seagen opérant dans toute la colonne d'eau au point A, à l'ouest du CGN. Le profil vertical de vitesse a été généré en considérant la loi de puissance déduite de l'étude statistique des données ADCP.	103

FIGURE 2.38 : Évolution de la puissance théorique P_{th} (gris) et techniquement exploitable P_{exp} (noir) générées par un système MCT Seagen sur la base d'une moyenne journalière, pendant une période d'un mois, au point A, à l'ouest du CGN.	104
FIGURE 2.39 : Configuration du réseau de 20 hydroliennes MCT Seagen installé à l'ouest du Cap Gris-Nez sur une superficie de 1 km ² (rectangle gris).	105
FIGURE 3.1 : Système Koursk (panneau du haut) avec l'ADCP (1), le GPS de haute précision et le module d'acquisition de données (2) et l'antenne GPS (3). Le panneau du bas représente le système Koursk tracté par un zodiac.	112
FIGURE 3.2 : Vitesse maximale du courant autour de l'île de Wight simulée par un modèle numérique 2D. Le cercle noir indique l'emplacement du point de Sainte Catherine. Source : ITP Renewables	114
FIGURE 3.3 : Emplacement du site favorable à l'implantation d'un parc hydrolien. Source : www.royalhaskoningdhv.com	115
FIGURE 3.4 : Emplacement du port de Yarmouth dans le Solent et localisation de la zone investiguée par ADCP tracté (contour rouge). Le point bleu indique l'emplacement du point amphidromique.	116
FIGURE 3.5 : Déploiement du système Koursk au large du port de Yarmouth.	117
FIGURE 3.6 : Élévation du niveau de la mer simulée par le SHOM dans le port de Southampton à 15 km de Yarmouth, le 1 ^{er} juillet (haut) et le 16 octobre 2015 (bas). Les rectangles gris indiquent les périodes au cours desquelles les différentes courantographies ont été réalisées au large du port de Yarmouth. Le rectangle rouge indique la période de 70 minutes au cours de laquelle l'ADCP a été amarré à une bouée (voir Fig. 3.7 l'emplacement).	118

- FIGURE 3.7 : Vecteurs de vitesse de courant mesurés par ADCP le long du trajet du bateau (flèches rouges), moyennés sur 30 secondes, 1 m sous la surface. Les flèches bleues représentent les vitesses obtenues par interpolation 2dVar sur un grille régulière. L'amplitude de la vitesse de courant est repérée par le dégradé de couleur gris/bleu. Les contours bathymétriques (10, 20 et 30 m) sont indiqués en pointillé. Les points noirs correspondent aux emplacement des valeurs maximales de vitesse (m/s). La croix noire tracée sur la première cartographie, indique la position où l'ADCP a été amarré à une bouée pendant une période de 70 minutes. 122
- FIGURE 3.8 : Distribution spatiale de la vitesse de courant le long de coupes transversales réalisées en octobre 2015 (sortie 4). Les radiales correspondantes sont indiquées en rouge sur la fenêtre en bas à droite. 124
- FIGURE 3.9 : Profils verticaux de vitesse obtenus lors du déploiement de l'ADCP (système Koursk) en position statique, pendant 70 minutes. Chaque profil a été moyenné sur une minute. Le profil noir représente l'évolution moyenne sur toute la période, de la vitesse sur la verticale. 125
- FIGURE 3.10 : Modélisation de la vitesse de courant de flot (haut) et de jusant (bas) en condition de marée moyenne. Le code couleur indique l'amplitude de courant. Les flèches révèlent la direction du courant. Le triangle noir représente la zone identifiée comme étant propice à l'installation du parc hydrolien de capacité 0,99 MW. Extrait de [DHI, 2015](#). 127
- FIGURE 3.11 : Photographie du port de Douvres. Source : www.doverport.co.uk 128
- FIGURE 3.12 : Port de Douvres avec la position de la zone de 0,45 km² (triangle noir) favorable à l'installation des récupérateurs d'énergie tidale. Source : www.doverport.co.uk 129

FIGURE 3.13 : Déploiement du système Kursk au large du port de Douvres. . .	130
FIGURE 3.14 : Élevation du niveau de la mer simulée par le SHOM dans le port de Douvres. Les rectangles gris indiquent les périodes au cours desquelles les différentes courantographies ont été réalisées au large du port de Douvres.	131
FIGURE 3.15 : Vecteurs de vitesse de courant mesurés par ADCP le long du trajet du bateau (flèches rouges), moyennés sur 30 secondes, 1 m sous la surface. Les flèches bleues représentent les vitesses obtenues par interpolation 2dVar sur un grille régulière. L'amplitude de la vitesse de courant est repérée par le dégradé de couleur gris/bleu. Les contours bathymétriques (15 et 20 m) sont indiqués en pointillé.	134
FIGURE 3.16 : Distribution spatiale de la vitesse de courant le long de coupes transversales réalisées en septembre 2014 (sortie 3). Les radiales correspondantes sont indiquées en rouge sur la fenêtre en bas à gauche.	135
FIGURE 3.17 : Emplacement du point où la vitesse moyenne mesurée (carré vert) et simulée (carré rouge) est la plus élevée. Extrait de DHI, 2015	136
FIGURE 4.1 : Gravure de l'expérience d'Osborne Reynolds (Reynolds, 1883). . .	146
FIGURE 4.2 : Observations de Reynolds sur les types d'écoulement obtenus lors de ces expériences (Reynolds, 1883).	147
FIGURE 4.3 : Fluctuations temporelles de vitesse turbulente en un point donné de l'espace mesurées dans l'air par un anémomètre à fil chaud (Benzi et al., 1995).	148
FIGURE 4.4 : Cascade d'énergie imaginée par Richardson.	151
FIGURE 4.5 : Cascade de Richardson dans l'espace fréquentiel.	154
FIGURE 4.6 : Emplacement du « Zeeschelde » (en bleu sur le panneau en haut à gauche) et de la ville de Temse.	157

FIGURE 4.7 : Sélection des meilleurs emplacements pour le test de prototypes d'hydroliennes. Les sites les plus énergétiques sont représentés par les points bleus, les sites respectant les aspects administratifs, légaux et pratiques sont identifiés par les points roses. La position géographique des villes de Lilo, Steenplein et Temse, mentionnées dans le texte, est également indiquée. Extrait de Goormans et al. (2013)	158
FIGURE 4.8 : Distribution cumulative des occurrences de vitesse (moyennée dans la colonne d'eau) obtenues à partir des mesures ADCP et RCM effectuées à proximité de la jetée de Lilo, du ponton de Steenplein et du pont de Temse. Extrait de Goormans et al. (2013)	159
FIGURE 4.9 : Séries temporelles de la vitesse de l'écoulement u par ADCP (a) et ADV (b) le 12 septembre 2015. Les lignes en pointillées gris indiquent les valeurs maximales de vitesse enregistrées pendant la phase de flot (u négatif) et de jusant (u positif). Les vitesses nulles sont indiquées par des croix vertes.	160
FIGURE 4.10 : Ponton flottant acheminé vers le site de test à proximité du pont de Temse.	162
FIGURE 4.11 : ADV et ADCP, installés sur un rail métallique à l'extrémité du ponton.	162
FIGURE 4.12 : Vue schématique de la configuration expérimentale. L'ADV était installé à une distance de 9 fois le diamètre D de la turbine W2E.	164
FIGURE 4.13 : Vue latérale du flotteur « Dragonfly II » (haut) et dispositif complet (flotteur + turbine) installé le long du ponton (bas). Source : www.water2energy.nl	165
FIGURE 4.14 : Photographie du prototype d'hydrolienne BEC lors de son installation dans l'Escaut.	166

- FIGURE 4.15 : Courbes caractéristiques du coefficient de puissance $C_p(\lambda)$ (haut) et de couple $C_\Gamma(\lambda)$ (bas) en fonction de la vitesse spécifique λ (notée TSR sur cette figure). Ces courbes ont été obtenues à la suite d'essais expérimentaux d'un prototype d'hydrolienne tripales de 0,8 m de diamètre, réalisés dans le bassin de houle et courant de l'Ifremer de Boulogne/mer (Mycek et al., 2014). Les tests ont été effectués à différentes vitesses U_∞ d'écoulement amont. 169
- FIGURE 4.16 : Restriction $x_i(t, T)$ d'une réalisation $x_i(t)$ d'un processus aléatoire. 173
- FIGURE 5.1 : Évolution temporelle dans la colonne d'eau, de la vitesse longitudinale u (haut) et transversale v (bas) mesurées par ADCP au cours d'une période de 5 jours en octobre 2014. 177
- FIGURE 5.2 : Ellipse de courant de marée obtenue par mesure ADCP des vitesses de courant, dans une couche d'un mètre d'épaisseur, sous la surface (gauche) et au dessus du fond (droite). Les points rouges et bleus représentent respectivement la vitesse de flot et de jusant. Les cercles pleins et vides indiquent les valeurs moyennes de la vitesse de flot et de jusant. 178
- FIGURE 5.3 : Profils de vitesse moyennés sur 10 minutes (courbes multicolores) au cours d'une période de 4 jours en octobre 2014 pour les phases de jusant (b) et de flot (d). Les profils moyens journaliers obtenus pour ces deux phases sont également représentés en bleu et rouge pour les phases de jusant (a) et de flot (c) respectivement. 179

- FIGURE 5.4 : (a) Vitesse de courant (composante longitudinale) enregistrée par ADV à une fréquence de 16 Hz pendant un cycle de marée le 23 octobre 2014. (b) Évolution du taux de turbulence I_u et de l'écart-type de vitesse σ_u au cours de trois périodes spécifiques du cycle de marée utilisées pour une analyse détaillée et numérotées de I à III dans (a). Le bleu clair, le bleu foncé et le noir correspondent aux variations des quantités étudiées au cours des périodes respectives. 180
- FIGURE 5.5 : Densité spectrale de puissance de la vitesse de courant (composante longitudinale) au cours de trois périodes successives d'un cycle de marée (haut) et densité spectrale compensée par un facteur en $f^{5/3}$. Chaque période est identifiée sur la Fig. 5.4 et numérotée de I à III. La ligne en pointillé rouge montre une pente spectrale de $-5/3$ 183
- FIGURE 5.6 : Évolution temporelle de vitesse de courant dans la couche de surface, d'une épaisseur de 2 m, en flot (rouge) et en jusant (bleu) enregistrée par ADCP et de la puissance P_{exp} générée par l'hydrolienne BEC (vert), le 15 et 16 septembre 2015. Les séries de vitesse et de puissance ont été moyennées sur 10 minutes. 186
- FIGURE 5.7 : Puissance P_{exp} générée par la turbine en fonction de la vitesse de courant de surface, d'une épaisseur de 2 m, en flot (points rouges) et en jusant (points bleus). Chaque point représente la moyenne sur une minute. Les courbes moyennes de puissance pour les phases de flot et de jusant sont représentées respectivement par les triangles et les cercles noirs. L'estimation de la courbe moyenne a été effectuée par intervalle de vitesse de 0,05 m/s. 187

- FIGURE 5.8 : Coefficient de puissance C_p estimé pour les phases de flot (points rouges) et de jusant (points bleus). Chaque point représente la moyenne sur une minute. Les points noirs représentent le C_p moyen estimé pour chaque intervalle de 0,1 m/s, en flot et en jusant respectivement, l'écart-type résultant de l'estimation des valeurs moyennes est illustré par les droites verticales, en pointillé. 188
- FIGURE 5.9 : Évolution temporelle de vitesse de courant de surface, d'une épaisseur de 2 m, en flot (rouge) et en jusant (bleu) enregistrée par ADCP et de la puissance P_{exp} générée par l'hydrolienne BEC (vert), les 7, 8 et 9 novembre 2014. Les séries de vitesse et de puissance ont été moyennées sur 10 minutes. 189
- FIGURE 5.10 : Puissance P_{exp} générée par la turbine en fonction de la vitesse de courant mesurée par ADCP et moyennée dans une épaisseur de 2 m sous la surface. Chaque point représente la moyenne sur une minute. La courbe rouge représente l'évolution moyenne de la distribution, estimée par intervalle de 0,05 m/s. L'écart-type σ_{C_p} résultant de l'estimation des valeurs moyennes est illustré par les droites verticales, en pointillé. 190
- FIGURE 5.11 : Puissance P_{exp} générée par la turbine en fonction de la vitesse spécifique λ . Chaque point représente la moyenne sur une minute. La courbe rouge représente l'évolution moyenne de la distribution, estimée par intervalle de 0,1 λ . L'écart-type σ_{C_p} résultant de l'estimation des valeurs moyennes est illustré par les droites verticales, en pointillé. 191
- FIGURE 5.12 : Courbe de puissance du prototype d'hydrolienne de la société W2E.192

- FIGURE 5.13 : (a) Puissance générée par la turbine W2E lors du test effectué le 7 novembre 2014. La couleur bleu désigne l'évolution temporelle de la puissance enregistrée à une fréquence d'acquisition de 100 Hz. La puissance moyennée sur une minute est représentée en gris. (b) Écarts-types des fluctuations de puissance estimés par intervalles de 10 minutes. Les périodes de vitesse modérée et élevée sont identifiées par les chiffres I et II, et délimitées par les couleurs bleu clair et bleu foncé. 193
- FIGURE 5.14 : DSP de la puissance générée par la turbine le 7 novembre 2014, au cours de deux périodes de flot identifiées sur la Fig. 5.13 et numérotées I et II. La ligne rouge montre la pente spectrale $f^{-5/3}$. La fréquence moyenne de rotation des pales de l'hydrolienne est donnée par f_0 pour chaque période. 194
- FIGURE 5.15 : Spectre de cohérence entre la vitesse du rotor et la puissance générée par la turbine. Chaque quantité a été enregistrée à une fréquence d'acquisition de 100 Hz. 197

PRÉFACE

L'ensemble des ressources énergétiques renouvelables offre un potentiel considérable. À l'échelle du globe, il représente environ 8 000 fois la consommation primaire mondiale d'énergie actuelle ([Ahmed et al., 2011](#)). Les 2/3 de cette manne énergétique sont attribués aux zones maritimes. En d'autres termes, les océans et les mers concentrent l'équivalent de 5 000 fois la consommation d'énergie mondiale.

À l'échelle planétaire, l'électricité ne représente que 17% du bouquet énergétique. Cependant la consommation annuelle moyenne d'électricité ne cesse d'augmenter. Cette croissance est due en grande partie aux pays en voie de développement, et plus particulièrement aux puissances émergentes. L'accès à l'électricité étant indispensable à leur développement économique (hygiène, santé, éducation). Selon les dernières estimations de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE), la consommation d'électricité dans le monde devrait augmenter de 75% entre 2007 et 2030, passant de 20 000 TWh à 34 000 TWh. Les pays en voie de développement seraient à l'origine de plus de 80% des nouveaux besoins, Chine et Inde en tête. Ainsi, il est fort à parier que l'électricité occupe une part non négligeable des usages finaux d'énergie au cours du XXI^{ème} siècle.

L'électricité est communément présentée comme une « énergie propre ». Les équipements l'utilisant n'émettent aucun gaz polluant ni gaz à effet de serre directement. Toutefois elle n'est pas une énergie disponible naturellement sur Terre ; elle est produite par conversion d'autres formes d'énergie en énergie électrique. On estime qu'elle est aujourd'hui produite à plus de 80% à partir de ressources non renouvelables et extrêmement polluantes (67% d'ori-

gine fossile et 13% d'origine nucléaire). L'électricité, comme toutes les formes ou vecteurs énergétiques, génère donc des impacts environnementaux, économiques et sociaux que l'on cherche à limiter. L'un des enjeux admis pour le XXI^{ème} siècle est celui d'une production à partir de ressources propres, fiables, sûres et renouvelables, et capables de se substituer aux centrales thermiques et nucléaires. Dans ce contexte, certains États mettent en place des politiques environnementales, comme le paquet énergie-climat en Europe, visant à inciter les producteurs d'électricité à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre et donc leurs contributions directes ou indirectes au dérèglement climatique.

La biomasse mise à part, les principales sources d'électricité renouvelable disponibles aujourd'hui présentent le défaut principal d'être plus ou moins intermittentes. En réalité l'intermittence concerne surtout l'électricité solaire et éolienne du fait d'un très important et très rapide développement dans le monde et de sa dépendance instantanée aux conditions météorologiques. L'électricité hydraulique, très majoritairement issue de barrages hydro-électriques, dépend elle aussi des conditions météorologiques, mais à l'inverse de l'éolien et du solaire, elle est stockable et très flexible. Néanmoins, les énergies renouvelables sont assez complémentaires. Le couple vent-Soleil permet notamment de réduire significativement le besoin de stockage ([Heide et al., 2010](#)). À plus petite échelle, il a été démontré que la houle accroît l'effet de lissage et qu'elle permettrait de réduire davantage les capacités nécessaires de stockage ([Babarit et al., 2006](#)). Ce type d'énergie fait partie intégrante du large panel énergétique disponible en milieu marin dont l'essentiel du potentiel provient de l'effet indirect du rayonnement solaire à savoir le vent, les courants de circulation thermohaline et la houle. Seuls les courants de marée générés par l'interaction gravitationnelle Terre-Lune-Soleil ont une autre origine.

Grâce à l'étendue et la variété de son domaine maritime, la France, riche de la deuxième Zone Économique Exclusive au monde, dispose d'un potentiel considérable de production pour contribuer à la demande énergétique sur les rivages continentaux et insulaires. Les énergies marines renouvelables représentent un vaste potentiel énergétique. Celui-ci contri-

buera à l'atteinte des objectifs nationaux, européens et mondiaux de réduction des émissions de gaz à effet de serre, tout en répondant aux problématiques de sûreté d'approvisionnement et de demande énergétique dans un contexte de raréfaction des énergies fossiles et de croissance soutenue de la demande mondiale.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

0.1 Ressources énergétiques de l'environnement marin

Les régions côtières françaises et en particulier la région de la Manche disposent d'un vaste potentiel naturel d'énergies marines renouvelables (EMR). Ce potentiel dépend des caractéristiques locales de l'environnement marin : vent en mer, houle et vagues, marée et courants de marée. Les ressources énergétiques sont soumises à de fortes variations spatiales et temporelles, notamment pour les zones de forts courants. Il est primordial de quantifier précisément ces variabilités afin d'évaluer le potentiel énergétique réel et la rentabilité économique d'un projet de récupération d'énergie marine.

Globalement, le potentiel énergétique de l'environnement marin provient essentiellement de six sources ayant une capacité de production industrielle à court et moyen terme très inégale :

1. L'Énergie marémotrice

L'énergie potentielle de la marée est directement proportionnelle à la différence de niveau entre haute et basse mer (marnage) de certaines zones côtières. La variation du niveau rend possible la récupération de l'énergie. À marée descendante, l'eau contenue dans le barrage s'écoule vers la mer en entraînant des turbines, qui génèrent un courant électrique. Le caractère prédictible de l'énergie marémotrice ainsi que sa faible variabilité saisonnière constituent les deux principaux avantages de cette technologie.

2. L'Énergie éolienne offshore

L'énergie est produite au moyen de turbines solidaires d'un support flottant à la surface de l'océan ou posé sur le sol marin. Le dispositif transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, elle-même convertie en énergie électrique grâce à un aérogénérateur. Les vents marins, plus réguliers et plus puissants que sur Terre, permettent aux éoliennes offshore de produire jusqu'à 60% d'énergie en plus que pour des éoliennes terrestres. Les zones propices à l'installation d'éoliennes sont celles où la vitesse moyenne annuelle du vent est supérieure à 7 m/s (25 km/h) à 80 m d'altitude.

Le taux de charge d'une éolienne est estimée à 22%, en d'autres termes, ce dispositif ne fournit sa pleine puissance qu'environ 2 000 heures par an ([Manwell et al., 2010](#)).

3. L'Énergie hydrolienne

Les hydroliennes permettent de transformer l'énergie cinétique des courants de marée ou fluviaux en électricité. Les différents designs actuellement utilisés par ces systèmes de récupération d'énergie sont très largement inspirés de la technologie éolienne. La plupart des hydroliennes comportent une roue à aubes ou une hélice constituée de pales montées sur un arbre dont la rotation (créée par le courant marin) entraîne une génératrice électrique. Ces systèmes de récupération sont installés sur un mât ancré dans les fonds marins ou monté sur un bâti constitué d'un tripode posé sur le fond, au moyen d'une barge.

Les zones propices à la production d'énergie hydrolienne sont assez limitées. On considère en général que les zones favorables sont celles où les vitesses de courant dépassent 2 m/s au flot et au jusant dans les conditions moyennes de vive-eau ([Multon, 2012](#)). Le courant de marée évolue de manière sinusoïdale, avec des amplitudes connues, variables avec les phases de la Lune. Ainsi, contrairement aux vents, les courants marins sont prévisibles à long terme. Le bilan global annuel, exprimé en heures de fonctionnement à pleine puissance, est de l'ordre de 4 000 à 6 000 heures, soit de 11 à 16 heures par jour ([Multon, 2012](#)). Le facteur de charge des hydroliennes atteint donc 46 à 66% à comparer au 22% moyen de l'éolien.

4. L'Énergie houlomotrice

Dépendante de l'énergie mécanique des vagues (la houle), l'énergie houlomotrice est une forme concentrée de l'énergie du vent. Quand le vent souffle sur la mer, des vagues se forment et transportent cette énergie. La houle peut voyager sur de très longues distances et apporter sur une côte de l'énergie qu'elle a collectée au large. Les dispositifs de récupération de l'énergie houlomotrice renferment un système de poids qui va osciller avec le phénomène de houle, remplissant puis vidant alternativement

des pompes hydrauliques. Ce processus permet de charger des accumulateurs à haute pression et d'entraîner des générateurs d'électricité. Bien que fortement marquée par les effets saisonniers, cette filière pourrait atteindre un facteur de charge de 30% à 50% ([Antonio, 2010](#)).

5. L'Énergie thermique des mers (ETM)

La production d'énergie thermique des mers s'appuie sur les effets thermodynamiques générés par la différence entre la température à la surface de la mer et celle en profondeur. Il s'agit d'une technologie particulièrement adaptée aux zones intertropicales où l'amplitude des températures est importante. L'installation doit être située dans des zones détenant un gradient thermique d'au moins 20°C entre les eaux profondes et de surfaces avec des fonds atteignant près de 1 000 m. Ces critères sont indispensables à la production d'une quantité d'électricité de 3 à 5 fois supérieure à celle consommée par les centrales dites à énergies maréthermiques.

6. L'Énergie osmotique

Cette énergie provient du potentiel physico-chimique produit par la différence de salinité entre l'eau de mer et l'eau douce. Lorsque deux masses d'eau, de concentration en sel différente sont en contact, les molécules d'eau douce ont naturellement tendance à passer du compartiment le moins condensé, vers le plus condensé, pour rétablir l'équilibre de concentration. C'est le phénomène de la pression osmotique. Il peut être mis à profit pour récupérer de l'énergie. La faisabilité technico-économique de ce dispositif est à l'étude. La clé sera le développement des membranes nécessaires au procédé qui résistent à l'usure et dont les coûts de production soient acceptables.

Toutes ces filières EMR n'en sont pas au même stade de développement technologique (Fig. 0.1). L'éolien offshore posé est dès à présent au stade commercial. L'éolien offshore flottant et l'hydrolien suivront à court ou moyen terme. Enfin le houlomoteur et le thermique seront opérationnels à moyen terme ou long terme.

Le rapport de la mission d'étude sur les énergies marines renouvelables adressé au

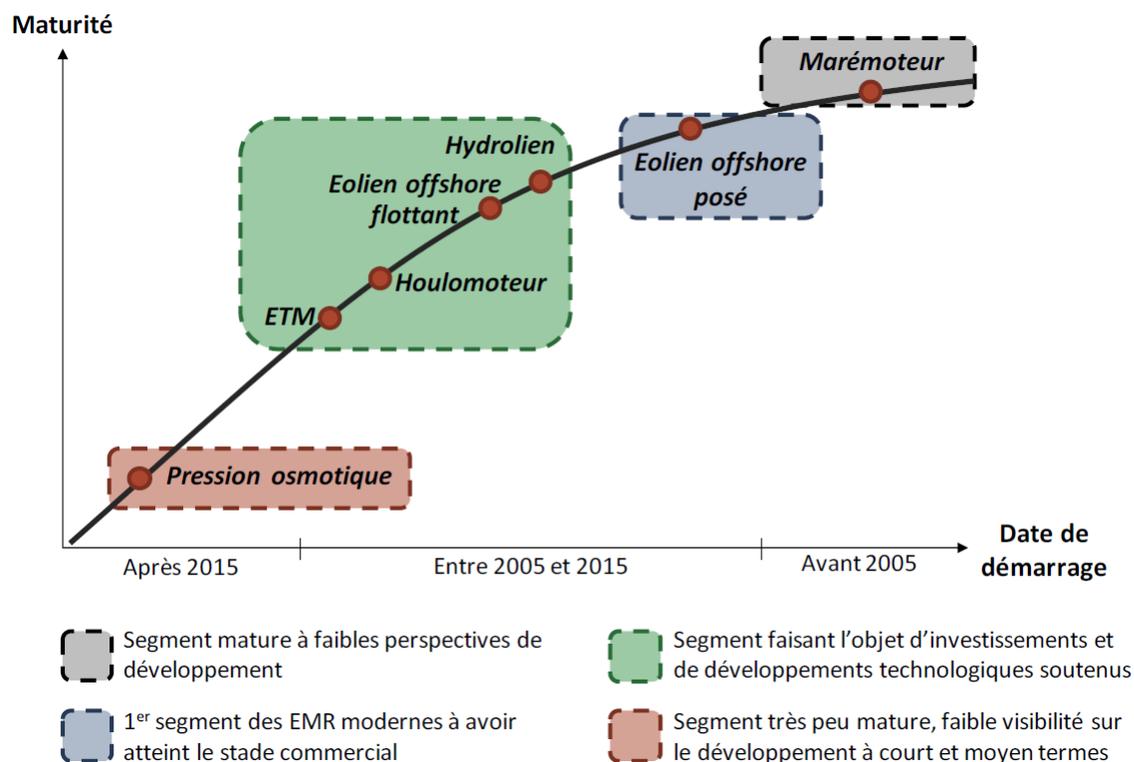


FIGURE 0.1 – Maturité des énergies marines, d'après France Energies Marines.

Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (Boye et al., 2013), estime que le stade commercial est atteignable en 2020 pour l'hydrolien ainsi que pour l'éolien flottant. L'hydrolien, prévisible et de gisement limité et localisé, est mûr et présente une forte compétition entre acteurs. Du point de vue du déploiement des fermes pilotes, les britanniques ont pris une longueur d'avance. Ils partagent avec la France un gisement rare et exceptionnel.

L'éolien flottant est moins avancé avec seulement deux prototypes en grandeur nature fonctionnels en mer mais avec une situation dans laquelle la France n'est pas en retard.

Le marémoteur est mûr technologiquement depuis longtemps mais pose des problèmes d'acceptabilité environnementale et sociétale.

Enfin, en ce qui concerne les filières jugées les moins avancées : l'énergie thermique des mers est coûteuse mais progresse avec un important marché de niches insulaires. Le hou-

lomoteur en est au stade d'un foisonnement de technologies encore peu éprouvées. Enfin, l'osmotique est encore immature, coûteux et problématique d'un point de vue environnemental (Gerstandt et al., 2008, Esteban et Leary, 2012).

Ces systèmes de récupération d'énergie marine font face à la même problématique. Tous doivent gérer des questions de robustesse en mer, de logistique, d'exploitation et de maintenance, de sécurité des personnels et d'installations, de conflit d'usages, de production, d'acheminement optimum de l'énergie et de problèmes administratifs complexes. Enfin, toutes doivent satisfaire des critères techniques et économiques précis pour être accueillies par le système électrique. Ces critères changent selon le modèle économique : les EMR sont naturellement plus rentables en Outre-Mer, par exemple, compte tenu des prix élevés d'électricité dans ces territoires du fait d'une production principalement issu de centrales thermiques au fioul.

En dépit de leur intermittence, les énergies marines pourront occuper une place de choix dans le mix énergétique, aux côtés d'autres énergies renouvelables, pour lisser la variabilité des productions. Toutes sont prévisibles avec précision, certaines à long terme (marées, courants et énergie thermique des mers), d'autres à plus court terme (houlomoteur, éolien).

0.2 Définitions et ordres de grandeurs relatives aux énergies marines

Avant de présenter les ressources et potentiels, il convient d'énoncer quelques définitions et ordres de grandeurs sur les énergies marines.

La puissance techniquement exploitable P_{exp} correspond à la quantité d'énergie par unité de temps que peut fournir une hydrolienne. Les termes analogues « puissance électrique » ou « productible » peuvent être trouvés dans la littérature. Cette grandeur a pour unité le watt (W). La puissance d'un système nous renseigne sur la rapidité avec laquelle l'énergie a été produite ou consommée. Dans le domaine des énergies renouvelables, l'unité la plus

couramment utilisée est le mégawatt (MW).

À titre indicatif, voici une liste non exhaustive des ordres de grandeurs atteints par différents systèmes de production énergétique (Multon, 2012) :

1. une hydrolienne : 0,5 à 1 MW ;
2. une éolienne offshore de dernière génération : 8 MW ;
3. l'usine marémotrice de la Rance : 240 MW ;
4. un réacteur nucléaire de type EPR : 1 600 MW.

Le Watt-heure (Wh) est une unité alternative de l'énergie électrique couramment utilisée. Un Wh correspond à l'énergie consommée ou délivrée par un système d'une puissance de 1 Watt pendant une heure. Par exemple, une hydrolienne d'une puissance électrique nominale de 1 MW fonctionnant à pleine puissance pendant 5 000 heures fournit une puissance : $1 \times 5\,000 = 5\,000 \text{ MWh} = 5 \text{ GWh}$. La production électrique annuelle des installations de production d'énergie présentée ci-dessus est mentionnée dans le tableau suivant (Multon, 2012) :

	Hydrolienne	Éolienne offshore	Usine marémotrice	EPR
P_{exp} nominale	1 MW	8 MW	240 MW	1 600 MW
P_{exp} annuelle	5 GWh	25 GWh	550 GWh	10 000 GWh

TAB. 0.1 – Puissance électrique nominale et annuelle de différentes installations de production d'énergie.

La puissance fournie par une hydrolienne est corrélée à la densité de puissance cinétique P dite primaire, disponible dans l'écoulement. Celle-ci est dépendante de la vitesse du fluide V et de sa masse volumique ρ . Par unité de surface, elle s'exprime comme :

$$P = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (1)$$

L'unité utilisée est le W/m^2 (W par unité de surface). Cette relation est également employée pour la technologie éolienne. Pour l'hydrolien comme pour l'éolien, la puissance dépend du

cube de la vitesse. Cependant les hydroliennes tirent profit de la masse volumique de l'eau, 830 fois plus élevée que celle de l'air. Ainsi, un courant marin neuf fois plus faible que le vent aura une puissance du même ordre (en excluant toutes considérations de perte énergétique).

0.3 Etat de l'art de la technologie hydrolienne

Les travaux présentés dans cette thèse ont été menés afin de préparer l'étape d'exploitation de l'énergie des courants de marée aussi appelée énergie tidale ou encore énergie hydrocinétique. Cette thèse repose donc essentiellement sur la technologie hydrolienne.

Malgré l'intérêt suscité depuis quelques années, l'exploitation de l'énergie hydrolienne accuse un sérieux retard par rapport à d'autres ressources renouvelables, notamment le solaire et l'éolien. Ce développement tardif s'explique essentiellement par le milieu, jugé hostile, dans lequel les hydroliennes sont vouées à être implantées. L'installation de dispositifs en milieu marin, particulièrement exigeant et agressif (corrosion due au sel, accumulation de micro puis de macro-organismes indésirables sur les structures immergées en mer), constitue un véritable défi pour les ingénieurs et physiciens des matériaux. Cependant, le développement de nouveaux matériaux tels que les composites ou encore les alliages métalliques ont apporté des propriétés nouvelles qui favorisent la conquête de l'environnement marin. L'hydrolien bénéficie également des énormes efforts techniques réalisés dans le domaine éolien.

0.3.1 Concepts de base

Les technologies d'extraction de l'énergie cinétique des courants de marée ont nettement progressées ces vingt dernières années (e.g. [Ben Elghali et al., 2007](#), [Elghali et al., 2008](#)). Plusieurs tests en bassin d'essais (e.g. [Bahaj et al., 2007](#), [Chamorro et al., 2013](#)) ou *in situ* (e.g. [Jeffcoate et al., 2015](#)) sont aujourd'hui recensés. De nombreuses méthodes de classifications des systèmes d'énergie tidale ont été proposées ([Khan et Bhuyan, 2009](#),

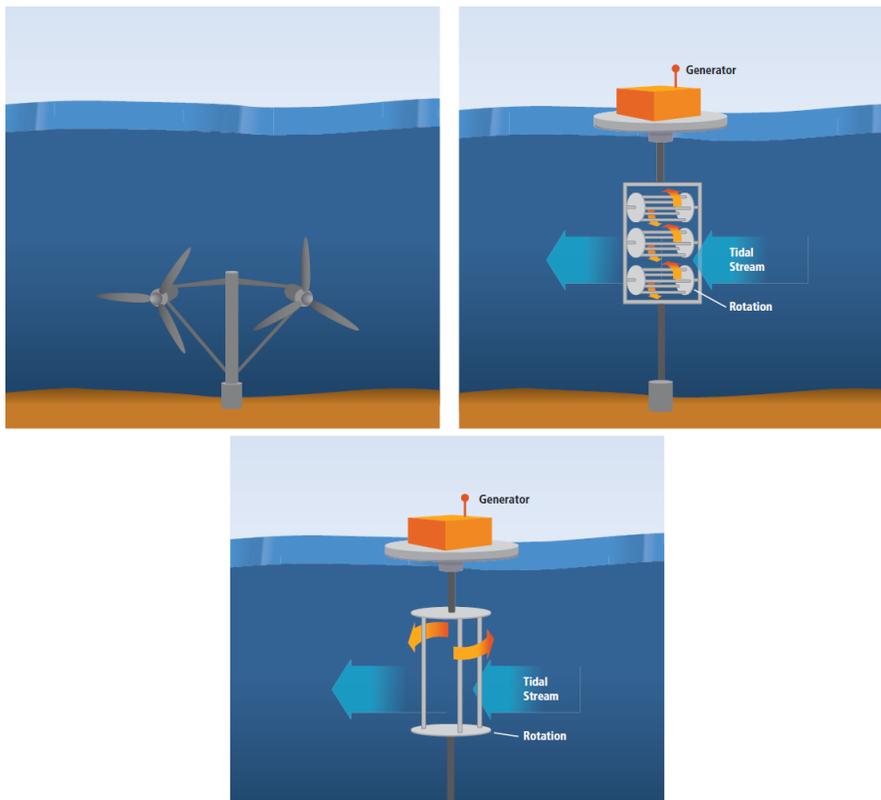


FIGURE 0.2 – Représentation schématique d’hydroliennes à axe horizontal (haut) et vertical (bas) (extrait de [Edenhofer et al., 2011](#)).

[DOE, 2010](#)). Le design de la plupart de ces systèmes sont très similaires à ceux utilisés dans l’industrie éolienne. En général, les dispositifs sont classés selon leur principe de fonctionnement. On distingue deux catégories : les turbines à axe horizontal et les turbines à axe vertical (Fig. 0.2). Certains systèmes sont dits à axe horizontal car l’arbre de rotation du rotor est dans le plan horizontal de l’écoulement incident. D’autres dispositifs sont dits à axe vertical car l’écoulement incident arrive perpendiculairement à l’axe de rotation. Un dispositif peut être composé de plusieurs turbines (Fig. 0.2).

La Fig. 0.3 présente l’éolienne offshore la plus puissante au monde, le modèle Haliade 150 de l’entreprise Alstom. Son rotor de 150 m de diamètre délivre une puissance nominale de 6 MW pour un poids total de 1 500 tonnes. Le second dispositif présenté sur la Fig. 0.3 est l’hydrolienne HS 1000 de la société norvégienne Hammerfest Ström. Avec un rotor de



FIGURE 0.3 – Éolienne Haliade 150 d’Alstom (gauche) et hydrolienne HS 1000 d’Hammerfest Ström (droite). Les deux systèmes de récupération d’énergie sont à axe horizontal.
Sources : www.alstom.com et www.hammerfeststrom.com.

21 m, elle fournit une puissance de 1 MW pour un poids total de 250 tonnes, socle inclu. Ce prototype a été testé en décembre 2011 sur le site du Centre Européen de la Recherche Marine (EMEC), au large des Iles Orcades, en Écosse.

La Fig. 0.4 compare la technologie éolienne et hydrolienne pour des turbines appartenant à une autre famille, celle à axe de rotation vertical. La plus grande éolienne de cette catégorie, mise au point par le laboratoire américain Sandia, est présentée. Installée sur le bord du Saint-Laurent, au Cap Chat (Canada), elle est aujourd’hui hors service. Mesurant 110 m elle délivrait une puissance de 4 MW.

La Fig. 0.4 montre également le prototype d’hydrolienne développé par l’entreprise canadienne Instream Energy Systems. Le diamètre du rotor est de 3 m et permet de fournir une puissance de 25 kW.

0.3.2 Avantages et inconvénients

Les installations hydroliennes disposent de trois principaux atouts : elles sont discrètes, compactes et leur production est prédictible. La plupart des hydroliennes proposées aujourd’hui sont des systèmes complètement immergés assurant une discrétion visuelle et sonore, du moins en surface. Sous l’eau, l’émission sonore d’un parc s’apparente à celle d’un gros navire. Cependant, à l’instar des éoliennes offshore, la plus puissante hydrolienne au monde



FIGURE 0.4 – Éolienne du laboratoire Sandia (gauche) et hydrolienne (en position de maintenance) de la société Instream Energy Systems (droite) à axe vertical. Sources : www.energy.sandia.gov et www.instreamenergy.com.

(1,2 MW) est montée sur un pieu (Fig. 0.5).

La calcul de la puissance théorique P_{th} , générée par une hydrolienne dans un écoulement de masse volumique ρ et de vitesse V s'écrit :

$$P_{th} = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (2)$$

S étant la section de l'aire balayée par les pales de la turbine. On montre alors que pour un écoulement de 2 m/s, la même puissance est obtenue dans l'eau avec un rotor de dimension réduite d'un facteur 3 par rapport à l'air (avec $\rho_{eau} = 1\,000\text{ kg/m}^3$ et $\rho_{air} = 1,225\text{ kg/m}^3$ à 10°C). Ainsi, la puissance de 1 MW est accessible pour une éolienne d'un rotor de 50 m de diamètre contre 18 m pour une hydrolienne. La compacité des hydroliennes autorise alors l'emploi d'équipements plus légers et à priori moins coûteux. Par ailleurs les hydroliennes sont conçues pour tirer profit des courants quasi-maximums alors que les éoliennes cessent d'exploiter le vent lorsque celui-ci atteint la vitesse de 90 km/h. Le caractère prédictible de la production énergétique d'une hydrolienne est également un avantage indéniable de cette technologie. Les courants de rivières, constants à l'échelle journalière et les fluctua-

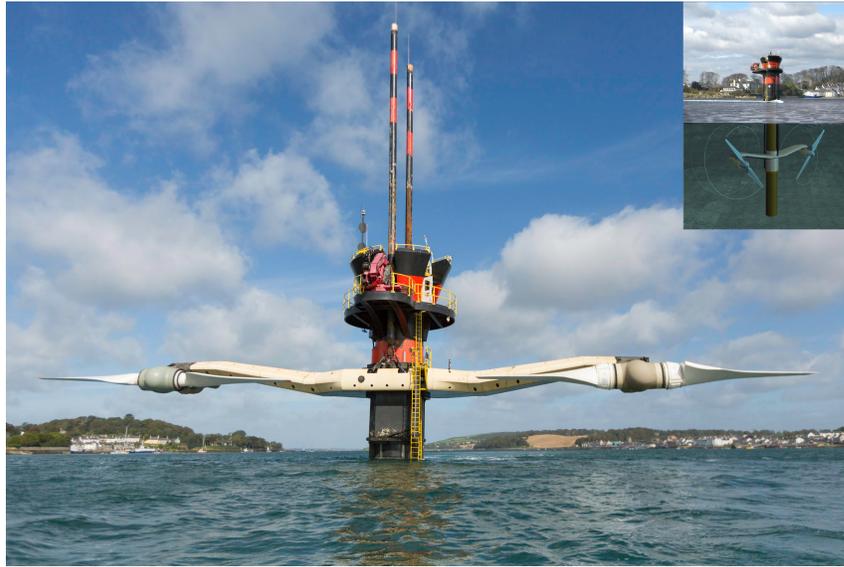


FIGURE 0.5 – Hydrolienne MCT SeaGen immergée dans le Strangford Loch en Irlande du Nord. Source : www.marineturbines.com.

tions régulières (sur une période de 12h environ sur les côtes européennes) des courants de marée offrent une régularité dont le vent est démunie. Cette particularité facilite la gestion de la production d'électricité par rapport aux éoliennes. Néanmoins, la question du stockage reste toujours à élucider. Les phénomènes de crues et de sécheresses empêchent la production d'électricité en rivière. De même, l'intensité des courants marins durant l'étape est trop faible pour être exploitée par les hydroliennes, celles-ci ayant une vitesse de mise en déclenchement de l'ordre de 1 m/s (0,5 m/s pour les récupérateurs de dernière génération). Ainsi, la production électrique en périodes creuses demeure toujours problématique.

0.4 Potentiel hydrocinétique et état des lieux de l'exploitation hydrolienne en France

En Europe, le potentiel théorique hydrolien est de l'ordre de 15 GW pour une production pouvant aller de 20 à 30 TWh/an. Ceci représente la consommation de 6 à 8 millions d'habitants. La France concentre à elle seule 20% du potentiel théorique européen, soit

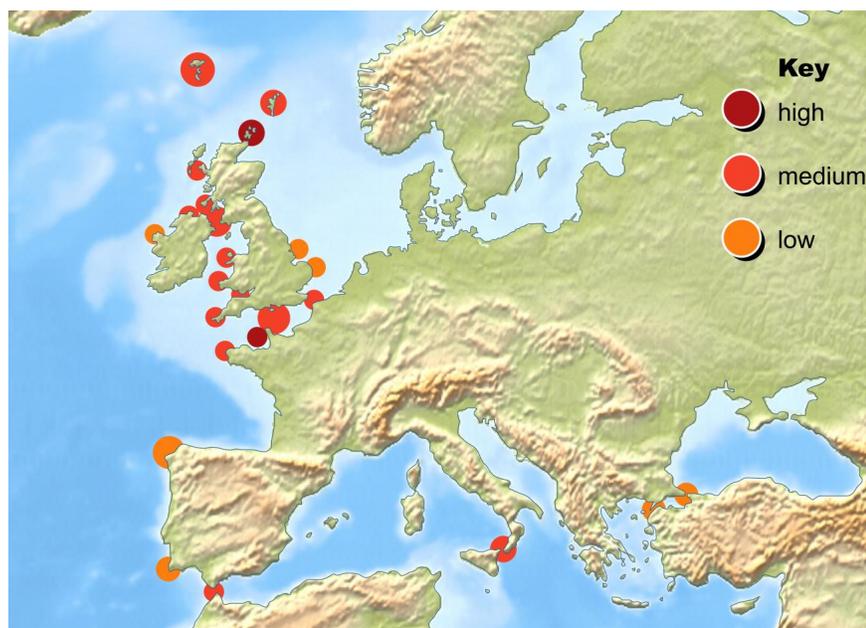


FIGURE 0.6 – Emplacements des sites propices à l’exploitation de l’énergie hydrolienne en Europe. Source : www.aquaret.com.

3 GW. Cela constitue le deuxième potentiel d’énergie hydrolienne en Europe derrière le Royaume-Uni qui dispose de près de 60% du potentiel total. L’essentiel du potentiel européen se situe dans des zones à marée où la vitesse moyenne du courant est supérieure à 1,5 m/s. Toutefois, ces zones sont peu nombreuses et se restreignent aux régions des caps ou encore des goulets entre les îles et le continent (Fig. 0.6). La majorité du potentiel métropolitain français se trouve le long des côtes de la Manche et des côtes bretonnes. Outremer, le potentiel de développement de la filière est faible. Les zones propices sont restreintes (ex : passes de lagons, où les courants sont permanents et parfois très intenses) mais permettraient une production décentralisée.

En France, les projets d’implantation de fermes hydroliennes ont pris de l’ampleur ces dernières années. En septembre 2013, un appel à manifestation d’intérêt destiné à soutenir l’installation de quatre parcs pilotes a été lancé par le gouvernement. Deux sites ont été retenus : le Raz Blanchard, à la pointe Nord-Ouest du Cotentin et le passage du Fromveur au large du Finistère (ces deux zones concentrant 80% du potentiel énergétique d’exploitation



FIGURE 0.7 – Hydrolienne Sabella D10 installé dans le passage du Fromveur. Source : www.sabella.fr.

des courants marins en France). De plus, depuis 2012, le site de Paimpol Bréhat, au large de Ploubazlanec dans les Côtes d’Armor en Bretagne, fait l’objet de tests en conditions réelles. Enfin, depuis septembre 2015, le passage du Fromveur abrite la première hydrolienne raccordée au réseau électrique français. Il s’agit du dispositif Sabella D10 (10 m de diamètre) d’une puissance nominale de 500 kW (Fig. 0.7).

0.5 Contexte et plan de thèse

Diminuer la part du nucléaire dans le mix énergétique français, lutter contre les émissions de gaz à effet de serre et augmenter la part des énergies renouvelables, tels sont les objectifs ambitieux de la loi sur la transition énergétique pour la croissance verte, adoptée le 22 juillet 2015 et promulguée le 18 août 2015. Dans la lignée des objectifs fixés par le Grenelle de l’environnement, elle ambitionne une diminution à 50% de l’énergie d’origine nucléaire dans la production d’électricité d’ici à 2025 (contre 77% en 2014) et à 32% en 2030,

la part de l'énergie tirée des énergies fossiles. Pour mener à bien cette mission nationale, la fermeture de centrales nucléaires est régulièrement évoquée, mais cela suppose d'accélérer le développement des énergies renouvelables, notamment dans le secteur hydrolien.

L'exploitation de l'énergie des courants de marée nécessite une étape préliminaire de caractérisation des ressources. De nos jours, de nombreuses études ont été menées pour estimer le potentiel théorique français et européen (e.g. [Abonnel et Achard, 2009](#), [Lawrence et al., 2009](#)). Cependant, ces études ne tiennent pas compte des restrictions impliquées par l'exploitation de l'énergie hydrolienne, telles que le rendement effectif ou encore les plages de fonctionnement des machines. D'autre part, ce potentiel est une moyenne annuelle et ne décrit pas les variations saisonnières ou locales dues à la géographie du milieu. Or, la sélection des zones d'implantation de production d'énergie des courants de marée ne peut se faire uniquement sur la base de la ressource moyenne annuelle. Un projet concret d'implantation d'hydroliennes nécessite des études locales et précises du potentiel.

Par ailleurs, bien qu'ayant un caractère prédictible, l'énergie des courants de marée n'en demeure pas moins fluctuante. La puissance électrique générée par une hydrolienne est soumise à de fortes variations qu'on appelle « intermittence ». Cette intermittence est intrinsèquement liée à la nature turbulente des courants. L'impact de cette turbulence sur la performance des systèmes de récupération d'énergie tidale est encore mal appréhendé et nécessite des études plus poussées.

La mise au point d'une méthodologie pertinente de quantification d'énergie tidale à partir de mesures de courant constitue le premier objectif de cette thèse. Le second, repose sur l'étude d'impact de la turbulence sur la performance de systèmes de récupération d'énergie. Ces deux objectifs ont constitué l'un des quatre piliers du projet européen « Pro-Tide », financé par le programme « INTERREG IVB NWE » (2012 - 2015). Ce projet, impliquant un consortium d'organismes publics et privés du Royaume-Uni, de la Belgique, des Pays-Bas et de la France s'est fixé comme directive d'élaborer des approches et des techniques nouvelles de conversion d'énergie des courants de marée.

Il se déclinait en quatre axes :

1. **Développement de systèmes novateurs de récupération d'énergie** : mise au point de prototypes d'hydroliennes adaptés aux faibles courants de marée ($< 1,5$ m/s). Tests des nouvelles technologies en milieu estuarien.
2. **Estimation du potentiel hydrocinétique et évaluation de la performance de systèmes de récupération d'énergie tidale** : caractérisation du potentiel hydrocinétique à partir de mesures radars et *in situ*. Évaluation de la performance des prototypes d'hydroliennes et étude d'impact de la turbulence sur leur rendement énergétique.
3. **Faisabilité économique** : surveillance, comparaison et évaluation de la performance économique des prototypes d'hydroliennes et exploration des possibilités d'investissement en matière de réduction des coûts et de développement commercial.
4. **Partenariat public-privé** : exploration et création de partenariats public-privé pour préparer, développer et exploiter les systèmes de récupération d'énergie. Cet axe comprenait une évaluation comparative de la réglementation dans différents pays et l'interprétation des directives de l'Union Européenne.

Les objectifs de ce travail de thèse s'attachent à répondre aux problématiques du deuxième axe. Celui-ci se décline en deux thématiques bien distinctes, chacune constituant l'une des deux parties de cette thèse.

Dans la **première partie** nous présentons la méthodologie et les résultats obtenus lors d'études portant sur l'estimation du potentiel hydrocinétique disponible sur quatre zones d'EMR en Manche-Nord du Golf de Gascogne : le mer d'Iroise (pointe de la Bretagne Occidentale), le détroit du Pas-de-Calais (région Hauts-de-France), ainsi qu'une zone au large du port de Douvres et de Yarmouth (Solent, Ile de Wight) en Angleterre. Les motivations quant au choix de ces sites d'études sont présentées en introduction des chapitres 2 et 3. Un bref rappel de la politique énergétique en vigueur dans chacune des régions affiliée aux sites d'études est proposé.

Pour la quantification du potentiel, deux méthodes d'estimation ont été employées :

- La première s'appuie sur la courantographie radar. Devenue routinière dans de nombreuses régions côtières (e.g. [Sentchev et Yaremchuk, 2007](#), [Sentchev et al., 2013](#), [Paduan et Washburn, 2013](#)), cette technique s'avère particulièrement attrayante pour la caractérisation des ressources hydrocinétiques. Encore jamais employée pour l'estimation du potentiel énergétique, la courantographie radar ou télédétection, a été utilisée pour quantifier le potentiel hydrocinétique en mer d'Iroise et dans le détroit du Pas-de-Calais.
- La deuxième méthode est une évaluation des ressources par ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) tracté. Les différentes campagnes de mesures ont été menées à l'extérieur du port de Douvres et de Yarmouth. Plusieurs sorties en mer ont été réalisées afin de couvrir différentes phases de marée. Sur chaque site, la succession de radiales a permis de cartographier l'évolution spatiale du courant sur une zone de 3,5 km², permettant de révéler les zones de forts courants de marée.

La **seconde partie** est une étude d'impact de la turbulence sur l'efficacité de fonctionnement de prototypes d'hydroliennes. Cette étude menée dans l'Escaut, en Belgique, s'appuie sur des séries temporelles (vitesse, puissance générée) collectées conjointement pendant des périodes d'essais en milieu estuarien de différents systèmes. Ces essais ont permis d'ouvrir des perspectives nouvelles en matière de quantification d'efficacité des récupérateurs d'énergie des courants de marée, installés en milieu naturel.

Partie I

ESTIMATION DU POTENTIEL HYDROCINÉ-
TIQUE EN MANCHE - NORD DU GOLF DE
GASCOGNE

Méthodologie de quantification du potentiel hydrocinétique

1.1 Introduction

La quantification du productible constitue la première étape d'un projet de conversion de l'énergie cinétique des courants de marée (Blunden et Bahaj, 2007). À ce jour, deux approches sont privilégiées pour estimer ce potentiel : les mesures *in situ* et la modélisation numérique. Parfois, ces deux méthodes peuvent être utilisées simultanément afin d'accroître les performances d'un modèle ou pour faciliter l'interprétation de données expérimentales (e.g. Goddijn-Murphy et al., 2013, Sentchev et Yaremchuk, 2016).

L'utilisation d'un modèle numérique bidimensionnelle est la méthode la plus répandue. Blunden et Bahaj (2006) ont notamment eu recours au modèle TELEMAC-2D, développé par EDF (Electricité de France), pour évaluer les ressources hydrocinétiques dans la zone de Portland Bill, en Grande-Bretagne. Les résultats du modèle ont été utilisés pour générer des séries temporelles de vitesse de courant sur une large zone, permettant d'identifier un secteur géographique favorable à l'implantation d'hydroliennes. En utilisant le modèle FVCOM, Karsten et al. (2008) ont estimé la puissance électrique pouvant être générée par un réseau d'hydroliennes installé dans la baie de Fundy, au Canada. Un autre exemple est

l'étude menée par [Xia et al. \(2010\)](#) portant sur l'estimation du potentiel hydrocinétique dans l'estuaire de la Severn, en Grande-Bretagne.

Ces dernières années, l'évolution des modèles numériques et le passage au 3D ont permis d'accroître la précision de l'estimation du potentiel hydrocinétique des sites EMR. Ces modèles permettent une meilleure résolution spatiale et une meilleure prise en compte de la bathymétrie et des processus physiques, tels que les frottements sur le fond. D'autre part, on pourra noter l'apport de la modélisation 3D pour la connaissance des profils de courant dans la colonne d'eau. De nos jours, deux modèles 3D sont couramment utilisés : le modèle ROMS (Regional Ocean Modeling System) et le modèle TELEMAC-3D. Le premier a notamment permis de mettre en évidence l'asymétrie des vitesses de courant dans la région des îles Orcades ([Neill et al., 2014](#)), site jugé très prometteur pour l'exploitation des courants de marée. Ce modèle a également été employé dans le cadre d'une étude préliminaire de quantification du potentiel hydrocinétique dans la passage d'Alas, en Indonésie ([Blunden et al., 2013](#)) ou encore pour estimer la variabilité spatio-temporelle du potentiel sur le plateau continental nord-ouest européen ([Robins et al., 2015](#)). Le second modèle numérique a été utilisé pour quantifier l'impact des vagues et de la rugosité du fond marin, variable selon les sites, sur l'estimation des ressources hydrocinétiques dans le passage du Fromveur ([Guillou et Thiébot, 2016](#), [Guillou et al., 2016](#)).

L'avantage majeur de la modélisation réside dans sa capacité à représenter des phénomènes sur le long terme et de les généraliser dans l'espace. Néanmoins, cette capacité repose sur sa principale limite : la simplification de la réalité. Celle-ci, généralement liée à une conceptualisation volontairement simpliste des phénomènes réels, génère souvent des approximations contestables. Ainsi, la modélisation constitue au mieux, un outil d'aide à la sélection des meilleurs sites d'implantation de technologies EMR. Les modèles peuvent difficilement fournir des résultats absolus ou être utilisés seuls sans données de terrain fiables et interprétées. Aussi, la connaissance de l'état du milieu marin nécessite l'acquisition, l'organisation et l'interprétation de mesures *in situ* de manière à intégrer la complexité de la

réalité spécifique au site.

La technique d'acquisition de données *in situ* est aujourd'hui bien établie et utilisée de manière routinière dans plusieurs régions océaniques côtières (e.g. Gooch et al., 2009, Legrand, 2009, Venugopal et al., 2011, Goddijn-Murphy et al., 2013). Le courantomètre ADCP tracté ou fixe, est souvent l'instrument privilégié pour des études sur la variation spatiale ou temporelle des propriétés de l'écoulement (amplitude, direction, anisotropie, turbulence...etc). La recherche du meilleur site d'implantation de technologie EMR nécessite l'acquisition de données en quantité et qualité suffisantes afin d'augmenter la fiabilité de l'étude. Si les mesures *in situ* ont comme principal avantage de pouvoir intégrer la complexité de la réalité et la spécificité au cas étudié, cela peut se traduire par des conditions de

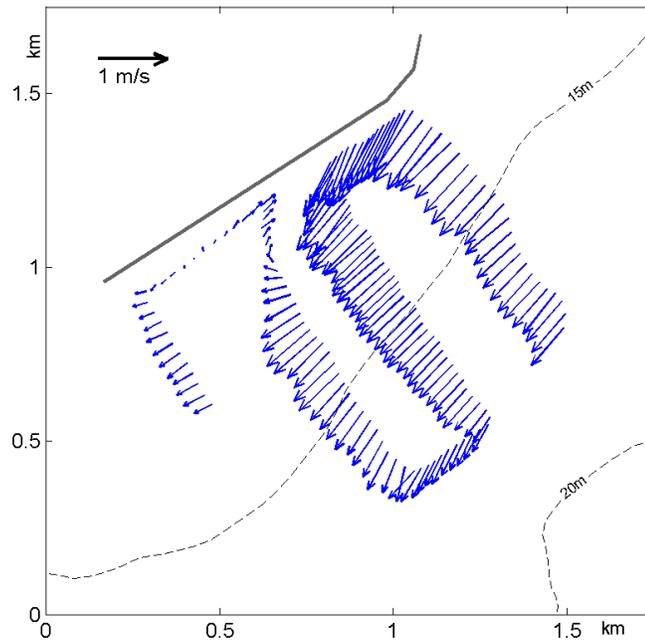


FIGURE 1.1 – Vecteurs de courant obtenus lors d'une étude sur la circulation de marée au sud du port de Douvres. Le tourbillon apparent est la conséquence de la renverse de courant et illustre bien la difficulté d'interprétation des résultats d'une courantographie par ADCP due à l'évolution temporelle de la marée.

mise en oeuvre contraignantes. Dans certaines situations, il peut être nécessaire de mener des campagnes de mesures coûteuses et sur des périodes assez longues. Les campagnes de mesures par ADCP tracté ont révélé très tôt leur efficacité dans l'identification des irrégularités spatiales de l'écoulement (e.g. [Geyer et Signell, 1990](#), [Simpson et al., 1990](#), [Vennell, 1994](#)). Cependant, cette technique ne permet pas de déterminer simultanément les paramètres de l'écoulement dans toute la zone étudiée du fait de l'évolution des courants de marée (Fig. 1.1), ceci engendrant de sérieux problèmes d'interprétation du champ de vitesse.

Inédite dans le domaine des EMR, la courantographie radar offre une alternative prometteuse à ces deux approches conventionnelles de quantification d'énergie tidale. Offrant une vision précise de l'écoulement et de son hétérogénéité spatiale et temporelle elle constitue un outil puissant d'analyse de la dynamique de marée.

1.2 La courantométrie radar

1.2.1 Applications de la courantographie radar

Au cours des deux dernières décennies, l'utilisation de radars hautes fréquences pour la cartographie des courants marins a connu un essor croissant. La performance de ces systèmes et la précision des mesures ont permis de mettre en évidence la complexité des phénomènes physiques régissant la dynamique côtière de différentes régions.

L'intérêt fondamental de la radio-océanographie par radar haute fréquence réside dans sa couverture synoptique tout temps, associée à une haute fréquence d'acquisition de données. Celles-ci sont particulièrement adaptées à la caractérisation de la dynamique côtière aux différentes échelles de temps. En raison de la couverture temporelle de ces données, de leur résolution, et de leur nature intégrée dans l'espace et dans le temps, elles se prêtent bien à la comparaison avec des quantités assez similaires calculées par le modèle ([Jouanneau et al., 2013](#)). Elles trouvent également un intérêt dans l'analyse des signaux de marée

(Prandle, 1991, Yaremchuk et Sentchev, 2011), dans la détection des processus méso-échelle tels que les tourbillons (Kim, 2010, Marmain et al., 2011) ou encore dans l'étude du transport lagrangien (Molcard et al., 2009, Shadden et al., 2009).

L'utilisation des radars HF ne se résume pas uniquement au domaine scientifique. Ils trouvent en effet de nombreuses applications dans le domaine civil et militaire où ils sont employés pour la surveillance maritime et la détection de cibles.

La répartition des radars HF à travers le monde est très inégale. La majorité de ces systèmes sont installés le long des côtes des Etats-Unis, de la Corée du Sud, du Japon, de Taïwan et de l'Espagne (Paduan et Washburn, 2013, Lana et al., 2016).

1.2.2 Mesure des courants superficiels : principe de fonctionnement

En 1955, Crombie (1955) a découvert et décrit les bases de la physique de la mesure. Il a introduit la notion d'interaction résonnante entre les ondes électromagnétiques (EM) et la surface de la mer : agitée par les vagues, elle diffuse les ondes électromagnétiques qu'elle reçoit et fournit un écho radar. L'étude des spectres Doppler montre deux pics d'énergie, disposés de part et d'autre de la fréquence porteuse ou fréquence de Bragg f_b de l'onde EM émise par le radar, entourés d'un continuum ayant une énergie beaucoup plus faible (Fig. 1.2). Pour une longueur d'onde radar λ_r , l'écho est essentiellement dû aux ondes de gravité qui se propagent dans la direction de tir du radar avec une longueur d'onde λ_b telle que :

$$\lambda_b = \lambda_r/2 \tag{1.1}$$

Selon Barrick et Weber (1977), l'analyse spectrale de l'écho radar montre que l'essentiel de la puissance se trouve concentrée dans deux raies quasi-monochromatiques, dites de « Bragg ». Elles sont générées par l'interaction résonnante entre l'onde radar et les trains de vagues de longueur d'onde λ_b .

Aujourd'hui, de nombreux instruments océanographiques ont un principe de fonction-

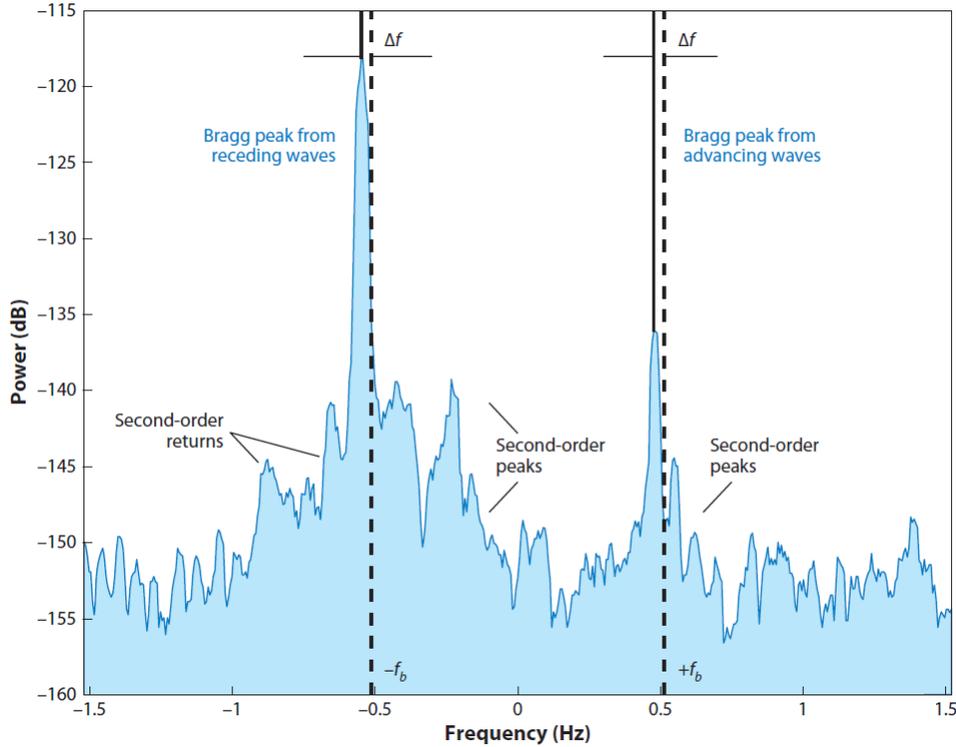


FIGURE 1.2 – Exemple de spectre Doppler rétrodiffusé par la surface de la mer en direction du radar (extrait de [Paduan et Washburn, 2013](#)). Les positions des fréquences de Bragg théoriques ($\pm f_b$) sont indiquées par les lignes en trait rompu. Les quantités Δf correspondent au décalage entre les positions mesurées et théoriques des raies.

nement basé sur ce phénomène de résonance de « diffraction de Bragg ». Le déplacement des vagues de « Bragg » est à l'origine d'un effet Doppler. Le courant de surface provoque un déplacement du train de vagues. La composante radiale du courant modifie les vitesses des vagues de Bragg et l'ensemble du spectre est décalé de la quantité Δf . Celle-ci rend compte du décalage fréquentiel entre les signaux émis et reçus par un radar HF pendant la durée de la mesure. En mer profonde et en absence de courant, ce déplacement n'est fonction que de la fréquence radar. La position des raies de Bragg est alors déterminée par la fréquence du radar. La fréquence de Bragg f_b s'écrit :

$$f_b = \frac{g}{\sqrt{\pi \lambda_r}} \quad (1.2)$$

où g est l'accélération de la gravité.

Ce décalage est la conséquence du transport des vagues par un courant de surface noté v (Stewart et Joy, 1974). La conversion du décalage Doppler Δf du signal rétrodiffusé en vitesse radiale de courant v est faite directement au travers la relation :

$$v = \frac{\lambda_r \Delta f}{2} \quad (1.3)$$

La reconstitution du vecteur courant à partir des vitesses radiales nécessite des mesures simultanées provenant d'au moins deux radars, chacun fournissant une composante radiale (Fig. 1.3). Les vitesses radiales obtenues sont des projections du vecteur vitesse sur les directions de visée des deux radars, mesurées dans l'espace distance – azimut. Par combinaison et interpolation de ces vitesses radiales il est possible de reconstituer la vitesse vectorielle du courant de surface et de générer des cartes de courant.

1.2.3 Systèmes WERA et COSMER

Dans cette étude, nous avons utilisé les données de vitesse de courant enregistrées par deux systèmes radars : le système Wellen RADar (WERA) installé sur les côtes de la mer d'Iroise et le système COSMER (Courants Océaniques de Surface MESurés par Radar) installé dans le détroit du Pas-de-Calais. Les radars HF opèrent dans une gamme de 6 à 30 MHz et possèdent une résolution radiale de 3 à 6 km. Leur portée peut atteindre quelques centaines de kilomètres. Les radars VHF fonctionnent dans une gamme plus étendue, typiquement de 30 MHz à 90 MHz et possèdent une portée moindre (de 15 à 35 km). Cependant ils disposent d'une résolution spatiale plus fine (quelques centaines de mètres), permettant d'étudier des phénomènes océaniques de plus petite échelle.

Le cycle de fonctionnement des radars en mer d'Iroise et dans le détroit du Pas-de-Calais est identique. Il est composé d'une séquence d'acquisition des spectres Doppler du signal rétrodiffusé de 9 minutes, suivie d'une séquence de traitement et d'attente d'une

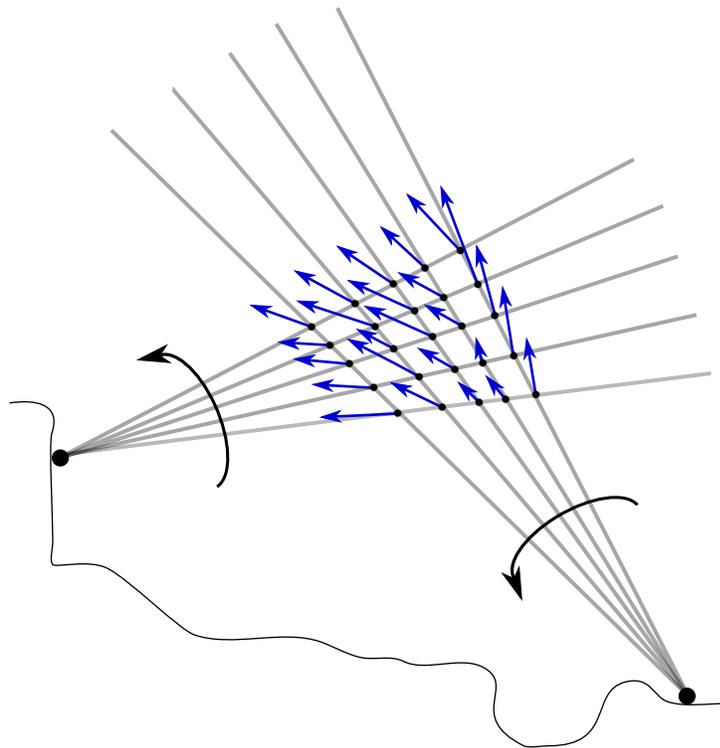


FIGURE 1.3 – Vecteurs de courant (flèches bleues) obtenus par combinaison des vitesses radiales mesurées par des réseaux radars déployés sur deux sites.

durée de 11 minutes. La sommation de six spectres consécutifs au cours de la phase d'acquisition (sommation incohérente) assure une précision de l'ordre de 4 cm/s et 5 cm/s pour les vitesses enregistrées respectivement en mer d'Iroise et dans le détroit du Pas-de-Calais. Ce cycle, répété trois fois par heure sur les deux sites, permet d'accéder à l'estimation des vitesses radiales de courant toutes les 20 minutes. Il s'agit des vitesses intégrées dans la couche de surface d'une épaisseur égale à $\lambda_r/8\pi$. Pour les configurations en mer d'Iroise et dans le détroit du Pas-de-Calais cette couche correspond typiquement à une épaisseur de 0,9 m et 0,25 m respectivement (Stewart et Joy, 1974).

1.2.4 Prétraitement et méthodes d'interpolation

L'onde reçue par le réseau de réception provient de toutes les directions, aussi un traitement angulaire est nécessaire pour identifier la zone de la surface de mer qui rétrodiffuse

l'information. Pour cela, deux méthodes conventionnelles sont utilisées : le traitement par direction d'arrivée (« Direction Finding » DF, [Barrick et Evans, 1979](#)) et la formation de voie (« Beam Forming » BF).

Le traitement par DF s'appuie sur la comparaison des phases et des amplitudes des ondes reçues par les monopoles du réseau afin de déterminer les directions de provenance des échos. Le DF permet d'utiliser des réseaux de petites tailles, composés majoritairement de 4 monopoles disposés en carré de diagonale $\lambda_r/2$. L'utilisation d'un réseau de réception faiblement étendu constitue le principal avantage du DF. Cependant, il n'est adapté qu'aux mesures de courant ([Forget et al., 2006](#)).

Le procédé de formation de faisceaux (BF) repose sur la théorie des antennes. L'ensemble des signaux reçus par chaque antenne est harmonisé de manière à établir un lobe directionnel. Ainsi, la sélection des signaux provenant d'une direction donnée est optimisée. Là où le traitement par DF autorise l'utilisation de systèmes de réception compacts, le BF nécessite généralement l'emploi de réseaux linéaires et donc plus étendus (de l'ordre de $8\lambda_r$). Le BF permet également la mesure du spectre des vagues de surface, une information que ne fournit pas le DF.

Néanmoins, les traitements azimutaux par DF ou BF fournissent des champs de vitesses radiales incomplets et bruités. L'hétérogénéité spatiale des points de mesures (concentrés à la côte, espacés au large), conjugués aux irrégularités temporelles d'acquisition (interférences, conditions météorologiques défavorables, bruit électromagnétique) peuvent diminuer sensiblement la quantité de données. Cette difficulté de couverture spatiale fortement hétérogène se trouve aggravée lors de traitements d'antenne sophistiqués de type MUSIC (« Multiple Signal Classification ») ([Schmidt, 1986](#)). Ces traitements sont utilisés pour améliorer la résolution azimutale des mesures, ainsi que pour échantillonner correctement des zones limitées, fortement hétérogènes (comme les environs d'Ouessant en mer d'Iroise). Cependant, cette méthode génère très fréquemment, sinon systématiquement, des « trous » dans les données, comme il apparaît sur la Fig. 1.4. Différentes approches sont utilisées pour augmenter le

nombre de données exploitables : corrections manuelles (tâche fastidieuse), méthodes interpolatives appliquées aux cartes de composantes radiales (pour combler les trous), différentes méthodes de rejet de valeurs aberrantes, suivies d'interpolations, méthodes de corrélation, etc. Toutefois, il existe plusieurs alternative à l'interpolation spatiale conventionnelle telle que l'interpolation optimale (Kim et al., 2008) ou la méthode OMA (Open-boundary Mode Analysis, Lekien et al., 2004, Kaplan et Lekien, 2007). Cette dernière est la plus utilisée au sein de la communauté scientifique. Les vitesses radiales de courant sont interpolées spatialement, au sens des moindres carrés, en utilisant des modes internes du domaine et modes orthogonaux sur les frontières, tous définis préalablement. Le point faible de la technique OMA est le contrôle insuffisant de lissage (lié à un nombre limité de modes) et la difficulté de combler des trous lorsque la taille de la zone sans mesures est supérieure à la plus petite échelle des modes internes. Ce dernier point handicape sensiblement la méthode et la rend

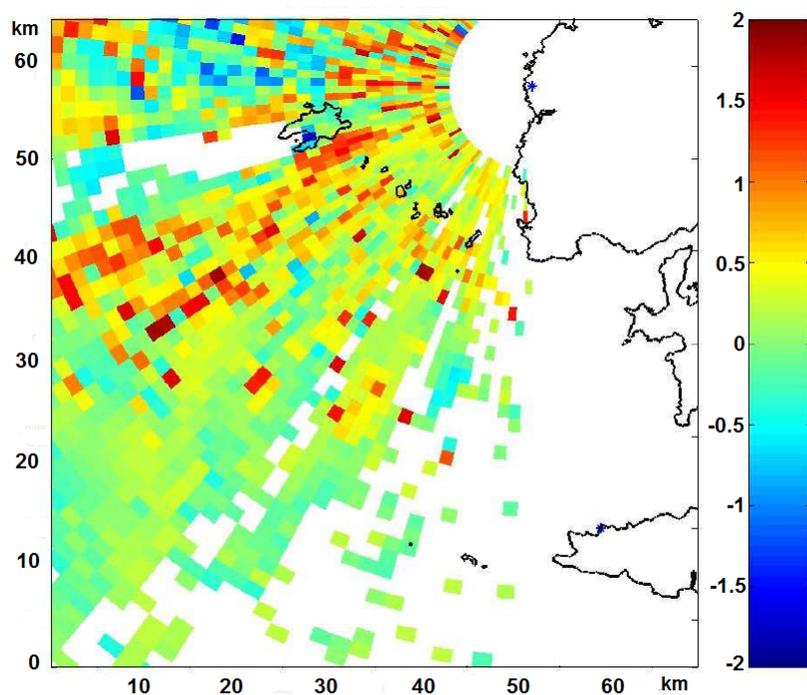


FIGURE 1.4 – Carte des composantes radiales de courant obtenue après traitement par la méthode MUSIC. Les mesures de vitesse radiales ont été réalisées à partir d'un radar HF installé à Garchine.

inutilisable en cas de faible couverture de la zone par un des radars.

Au cours des dernières années, une technique d'interpolation variationnelle a été élaborée : la méthode « 2dVar » (Yaremchuk et Sentchev, 2009). Particulièrement adaptée au traitement des vitesses radiales en présence d'un bruit dans les mesures et de multiples lacunes, elle permet une meilleure restitution d'un champ de courant. L'analyse comparative de la méthode 2dVar et OMA, effectuée dans le cadre d'expériences jumelles, a montré la performance de la méthode variationnelle, sa supériorité et sa flexibilité, en ce qui concerne la précision de restitution du champ de vitesse, pour différents niveaux de bruits dans les données, allant de 0 à 100% (Yaremchuk et Sentchev, 2009). Cette méthode, présentée dans la sous-section suivante, a été appliquée aux mesures radars obtenues à la suite des campagnes effectuées dans le détroit du Pas-de-Calais (Sentchev et Yaremchuk, 2007) et en mer d'Iroise (Sentchev et al., 2013). Elle a également été appliquée pour reconstituer le champ de vitesse à partir des campagnes de mesures d'ADCP tracté effectuées dans le Solent et au large du port de Douvres.

1.2.5 Méthode d'interpolation 2dVar

Plaçons nous dans le cas d'un exercice d'interpolation du champ de vitesse à partir des valeurs des vitesses radiales enregistrées par radars.

Soit un domaine océanique Ω partiellement délimité par la ligne de côte $\partial\Omega_0$. Les projections v^* du champ de vitesse $\mathbf{v}^t(x, y)$ sur les directions \mathbf{r} de visée radars sont observées au sein d'un ensemble discret de points x_k , $k = 1, \dots, K$ situés le long des faisceaux. L'objectif de la méthode 2dVar est d'obtenir une estimation \mathbf{v} de \mathbf{v}^t donnant les vitesses v_k^* et leurs erreurs d'observation $\sigma(v_k^*)$.

En suivant la méthodologie standard de l'interpolation variationnelle, la « meilleure » estimation de \mathbf{v} est obtenue en maximisant sa probabilité d'apparition exprimée comme

une fonction de densité de probabilité Gaussienne (e.g. [Thacker, 1989](#)) :

$$\mathcal{P}(\mathbf{v}) = \exp[-J(\mathbf{v})] \quad (1.4)$$

L'argument de l'exposant, appelé la « fonction coût » est quadratique et consiste généralement en deux termes :

$$J = J_d + J_r \quad (1.5)$$

Le premier terme J_d , mesure la « distance » entre les observations v^* et les composantes correspondantes du champ inconnu de vitesse \mathbf{v} aux points d'observations :

$$J_d = \frac{1}{2} \left[\sum_{k=1}^K \sigma^{-2}(v_k^*) [\mathbf{v} \cdot \mathbf{r}_k - v_k^*]^2 \right] \quad (1.6)$$

Le second terme J_r est introduit pour contrôler le degré de lissage du champ des vitesses interpolées. Ce terme s'exprime comme :

$$J_r = \frac{K}{2A} \int_{\Omega} [W^d(x, y)(\Delta \operatorname{div} \mathbf{v})^2 + W^c(x, y)(\Delta \operatorname{curl} \mathbf{v})^2] dx dy \quad (1.7)$$

où A est la superficie du domaine d'interpolation et où $\operatorname{div} \mathbf{v}$, $\operatorname{curl} \mathbf{v}$ et Δ sont respectivement la divergence, la vorticité et l'opérateur laplacien tels que :

$$\operatorname{div} \mathbf{v} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \quad (1.8)$$

$$\operatorname{curl} \mathbf{v} = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (1.9)$$

$$\Delta = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2}{\partial^2 y} \\ \frac{\partial^2}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2}{\partial^2 y} \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

Les fonctions $W^d(x, y)$ et $W^c(x, y)$, variables spatialement, correspondent à la variance d'erreur du calcul de divergence et de vorticité respectivement (Thacker, 1988). Contrairement à $\sigma^{-2}(v_k^*)$ qui peut ˆetre estimée expérimentalement avec un certain degré de confiance, les fonctions $W^d(x, y)$ et $W^c(x, y)$ sont largement inconnues mais peuvent ˆetre obtenues à partir de considérations *ad hoc*. La variabilité spatiale de ces deux fonctions a été supposée inversement proportionnelle à la densité locale $\rho(x, y)$ de points d'observations radars telle que :

$$W^{c,d} = \alpha^{c,d} \rho^{-1} \quad (1.11)$$

où α^c et α^d sont égales à l'inverse au carré des amplitudes c^{-2} et d^{-2} des champs correspondants. Typiquement, l'amplitude de c de $\Delta \text{curl} \mathbf{v}$ est donnée par : $c = V/L^2 \delta x$ où V est l'amplitude de \mathbf{v}^t , L est l'échelle spatiale ($\sim 5-10$ km) du champ de vitesse interpol e et δx représente la distance entre deux points successifs de la grille régulière d'interpolation. Les quantités V et L sont déduites à partir d'analyses statistiques des vitesses radars. Par ailleurs, l'amplitude d du champ divergent a été supposée nettement inférieure à c (e.g. pour un courant quasi-géostrophique : $d \sim \gamma.c$ où γ est le nombre de Rosby, fix e à 0,2 pour l'interpolation des vitesses).

Après la spécification de la fonction de densité de probabilité de toutes les configurations $\mathbf{v}(x, y)$ dans l'espace \mathcal{V} , la solution optimale, en terme d'erreur d'approximation, du champ interpol e est obtenue en maximisant la probabilité $\exp(-J)$, ou, de manière équivalente, en minimisant J par rapport à \mathbf{v} . Techniquement, la minimisation peut ˆetre réalisée dans le sous-espace $\mathcal{V}_0 \subset \mathcal{V}$ lequel est contraint par des conditions supplémentaires imposées. Les champs interpol es pr esent es dans cette thèse ont été obtenus en imposant la condition simpliste : $\mathbf{v}(\partial\Omega_0) = 0$, le long de la ligne de cˆote. Autrement dit, chaque champ vectoriel bidimensionnel de vitesse aux points d'une grille régulière aux valeurs des vitesses radiales

mesurées a été défini en minimisant J sous la condition $\mathbf{v}(\partial\Omega_0)$:

$$J_d + J_r \longrightarrow \min_{\mathbf{v} \in \mathcal{V}_0} \quad (1.12)$$

1.3 Utilisation de courantomètres acoustiques pour la détermination du profil vertical de vitesse

Bien que l'utilisation de systèmes radars comporte de nombreux avantages (couverture spatiale étendue, haute résolution, acquisition de données continues), ces dispositifs nous renseignent uniquement sur les propriétés de l'écoulement dans la couche de surface. Toutefois, les systèmes de récupération d'énergie tidale répertoriés jusqu'à présent sont conçus pour fonctionner à des niveaux de profondeurs variables selon le constructeur. Aussi, la connaissance du profil vertical de vitesse s'avère indispensable à la quantification du potentiel hydrocinétique d'un site d'énergie marine. Pour cela, l'instrument le plus couramment utilisé est le profileur acoustique ADCP. L'appareil peut être déployé sur le fond marin, orienté « tête » vers le haut (Fig. 1.5), ou en surface, orienté « tête » vers le bas, en position fixe ou mobile. La configuration fixe permet d'étudier la variation temporelle de l'écoule-

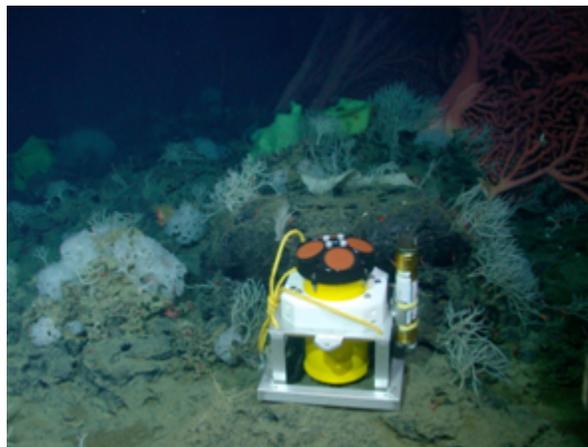


FIGURE 1.5 – ADCP déployé en position « tête » vers le haut sur le fond marin. Source www.teledynemarine.com.

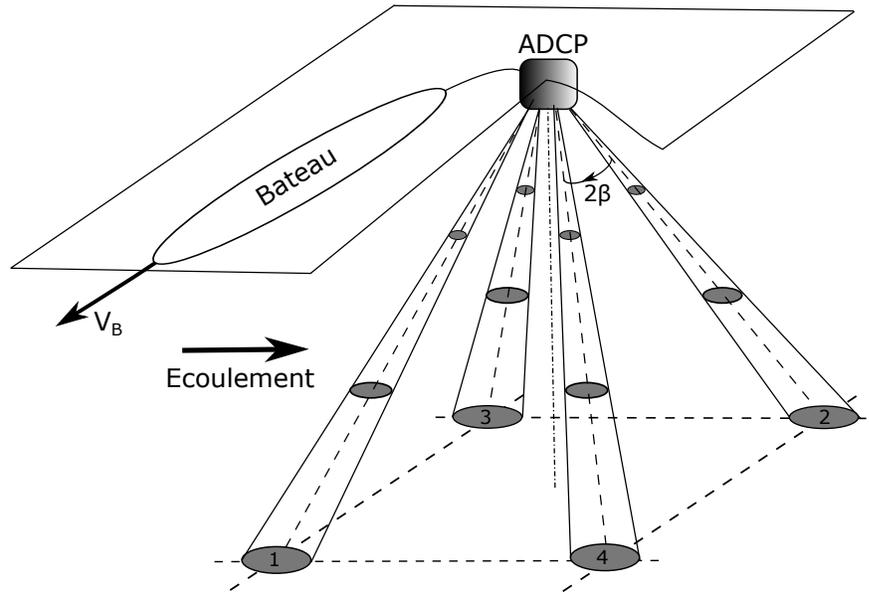


FIGURE 1.6 – Schéma d'un ADCP tracté par un bateau naviguant à une vitesse V_B . Les quatre faisceaux acoustiques émis par les transducteurs sont également représentés. L'ouverture des faisceaux est définie par l'angle $\beta = 20^\circ$.

ment sur des durées de plusieurs mois. En configuration mobile, l'appareil est monté sur la coque ou tracté par un navire (Fig. 1.6) permettant ainsi de mesurer les variations spatiales de l'écoulement.

Suivant les applications, différents types d'ADCP peuvent être déployés. Cinq catégories d'appareils sont référencées, chacune se distingue par un fréquence de travail différente : 75, 150, 300, 600 et 1 200 kHz. La portée des instruments dépend des valeurs de fréquences. Dans le cadre de cette thèse, des ADCPs Teledyne RDI de 600 et 1 200 kHz d'une portée nominale de 60 et 25 m respectivement ont été utilisés.

Les ADCPs utilisent l'effet Doppler afin d'estimer la vitesse des particules ou micro-organismes marins transportés par l'écoulement, ces derniers étant considérés comme des traceurs passifs de l'écoulement. Les transducteurs de l'ADCP effectuent des mesures indépendantes d'intensités rétrodiffusées et de vitesse de courant le long de chaque faisceau, orienté de 20° par rapport à la verticale (Fig. 1.7). La discrétisation verticale (taille D des

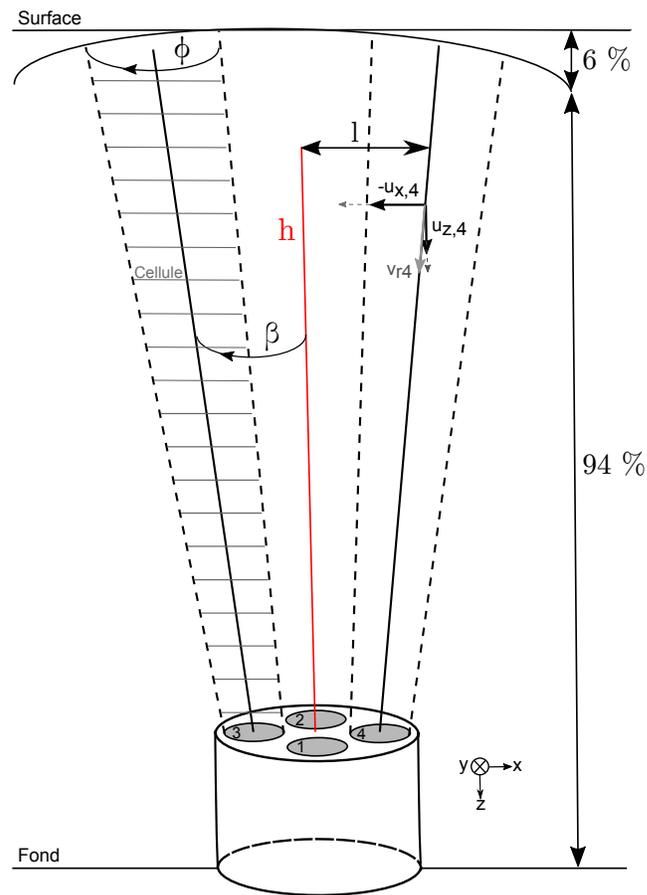


FIGURE 1.7 – Schéma de la géométrie d'un ADCP RDI installé sur le fond marin. Seuls les faisceaux n°3 et n°4 sont représentés. L'angle $\phi = 30^\circ$ est l'angle d'émission des transducteurs. L'ouverture des faisceaux est définie par l'angle $\beta = 20^\circ$.

cellules aussi appelées « bins ») est choisie par l'utilisateur. La base de la première cellule est espacée du transducteur par un « blanking space » dans lequel le signal n'est pas pris en compte, du fait de la vibration de la céramique juste après l'émission. Ce phénomène induit des perturbations du champ de pression qui parasitent les mesures d'intensités rétrodiffusées et des vitesses. Chaque cellule de mesure est liée à ses deux cellules adjacentes. Par conséquent, les mesures de vitesses, réalisées successivement, sont légèrement corrélées entre elles. La propagation des vagues dans la couche de surface, ou les effets de frottement qui règnent au voisinage du fond peuvent contaminer les signaux rétrodiffusés, engendrant

des valeurs de vitesse erronées dans les deux couches respectives. En pratique, les données sont considérées comme acceptables jusqu'à une hauteur $H = d \cos(\beta)$, où d est la distance entre l'ADCP et le fond pour une configuration « tête » vers le haut, ou, la distance entre l'ADCP et la surface, pour une configuration « tête » vers le bas. Ainsi, pour une ouverture des faisceaux β de 20° , les mesures de vitesses sont considérées comme étant fiables dans 94% de la colonne d'eau alors que les 6% au voisinage du fond/surface sont exclus (Fig. 1.7).

Le principe de la mesure est le suivant : les transducteurs émettent une onde acoustique de fréquence ν_0 qui est rétrodiffusée à une fréquence ν_1 au contact des particules en mouvement (Fig. 1.8). Le décalage fréquentielle entre l'onde incidente et réfléchi permet d'estimer la vitesse radiale v_r de la particule telle que :

$$v_r = c \frac{(\nu_1 - \nu_0)}{2 \nu_0} \quad (1.13)$$

où c est la vitesse de propagation de l'onde dans l'eau. Seule la composante radiale peut être mesurée alors que l'angle α entre le vecteur de norme V attribué à la particule et la direction de visée du transducteur sont inconnus. Les profileurs ADCPs, munis d'un compas magnétique, décomposent les vitesses enregistrées en composante est-ouest u_x , nord-sud u_y et verticale u_z . Au moins trois faisceaux sont nécessaires pour la détermination du champ de vitesse en 3 dimensions.

1.4 Méthodologie de quantification d'énergie tidale

La sélection de sites pour des projets EMR nécessite une bonne connaissance de la dynamique régionale côtière et l'application d'une méthodologie pertinente de quantification des ressources hydrocinétiques. Pour cela, l'EMEC (Legrand, 2009) a proposé une liste de paramètres de l'écoulement, dont l'estimation vise à accroître la précision de l'évaluation de la ressource tidale. Cette section recense et décrit brièvement chacun de ces paramètres.

1.4.1 Force de courant, asymétrie des vitesses et de direction de courant

La détermination de la force du courant comprend l'estimation de la vitesse moyenne et maximale de l'écoulement de marée. La vitesse ou amplitude moyenne de courant peut être estimée au cours d'une phase spécifique de la marée (flot ou jusant) incluant l'étalement de courant ou encore durant un cycle complet de marée vive-eau/morte-eau.

La vitesse maximale est définie comme le pic de vitesse atteint pendant une durée de 10 minutes sur toute la période d'analyse. L'évaluation de ce paramètre est nécessaire pour la prédiction des efforts et le stress mécanique subit par la structure de l'hydrolienne, en particulier par les pales et les fondations.

L'asymétrie de l'écoulement concerne d'une part, l'asymétrie des vitesses de courant notée a , d'autre part l'asymétrie de la direction du courant dominant notée $\Delta\theta$, entre les phases de flot et de jusant.

Un déséquilibre entre l'amplitude de courant de flot et de jusant peut exister (Fig.

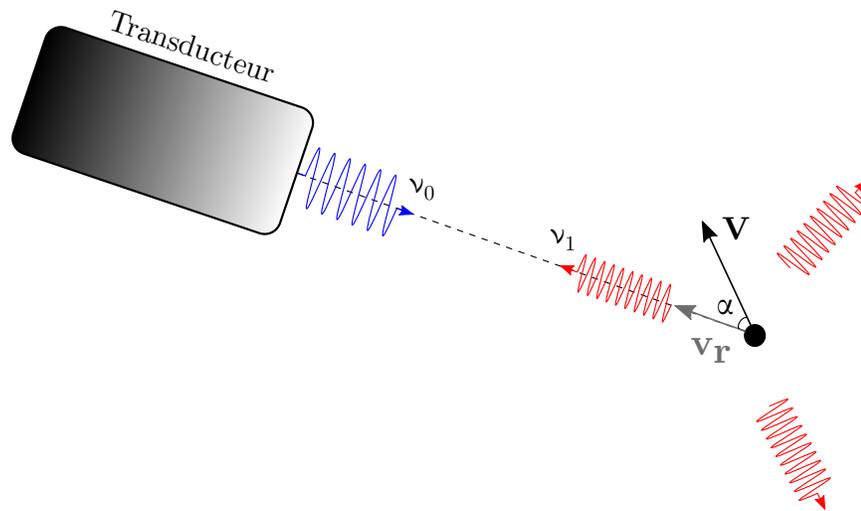


FIGURE 1.8 – Principe de la mesure de la vitesse d'une particule contenue dans l'écoulement par effet Doppler. L'onde incidente de fréquence ν_0 émise par le transducteur est rétrodiffusée à la fréquence ν_1 par une particule en mouvement (cercle noir). La particule est caractérisée par une vitesse V , faisant un angle α avec l'axe central du transducteur (ligne en pointillé). La vitesse radiale v_r , mesurée par effet Doppler, est la projection de V le long de l'axe central du transducteur.

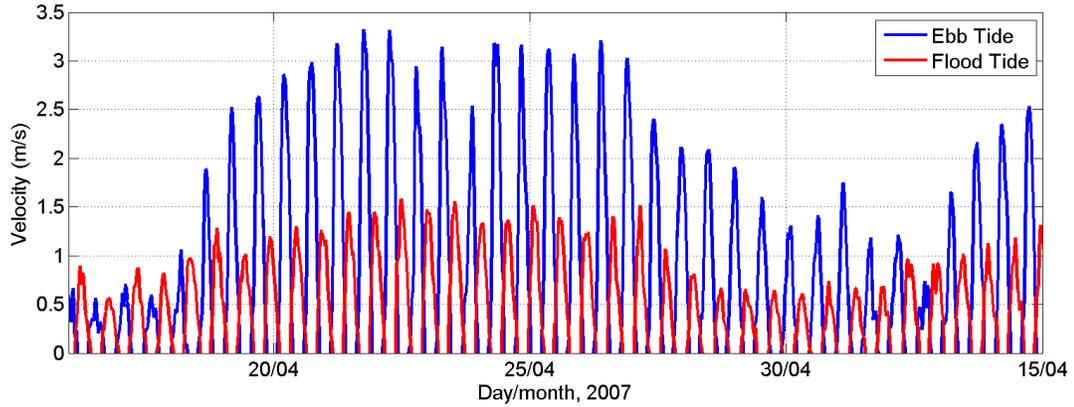


FIGURE 1.9 – Évolution de la vitesse de courant de surface mesurée par radar au sud du passage du Fromveur, en mer d'Iroise. Les couleurs bleu et rouge distinguent les vitesses de jusant et de flot respectivement.

1.9), générant un écart significatif dans la production de puissance hydrocinétique au cours d'un cycle de marée. L'asymétrie des vitesses de courant est déterminée en considérant les vitesses moyennes de flot et de jusant, incluant les périodes d'étales de courant. Cette relation s'écrit :

$$a = \frac{\langle V_{flot} \rangle}{\langle V_{jusant} \rangle} \quad (1.14)$$

La connaissance de la direction du courant dominant est essentielle pour l'évaluation rigoureuse du potentiel hydrocinétique d'un site EMR. La plupart des systèmes de récupération d'énergie étant à axe horizontal fixe, il est nécessaire d'aligner les machines avec la direction du courant dominant de manière à récupérer le maximum d'énergie. L'idéal pour ce type de dispositif est un écoulement unidirectionnelle avec un flux de flot et de jusant se propageant en sens opposé. Cependant, un écart angulaire $\Delta\theta$ entre la direction du courant de flot et de jusant peut être observé (Fig. 1.10). Cet écart est déterminé au travers la relation (Gooch et al., 2009) :

$$\Delta\theta = |\theta_{flot} - \theta_{jusant} - 180^\circ| \quad (1.15)$$

où l'écoulement idéal défini ci-dessus correspond au cas $\Delta\theta = 0^\circ$.

L'ensemble de ces paramètres peuvent être évalués par la technique d'analyse en com-

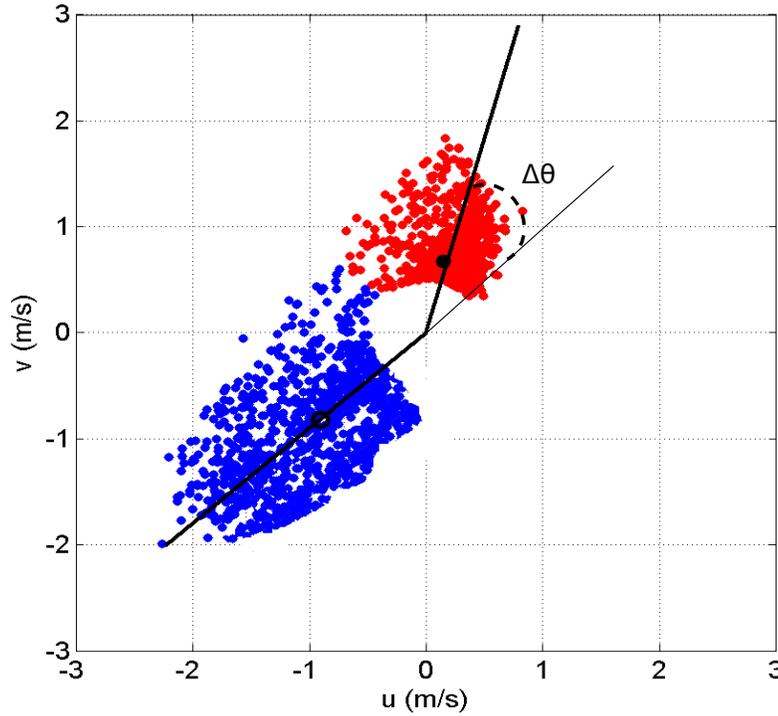


FIGURE 1.10 – Nuage de points obtenu à partir des vitesses de courant mesurées par radar au sud du passage du Fromveur. Les points bleus et rouges distinguent les vitesses de jusant et de flot respectivement. La vitesse moyenne pour chacune de ces phases de marée est représentée par un cercle et un rond noir respectivement. Seules les vitesses supérieures à 0,5 m/s sont représentées. Les traits noirs indiquent la direction du courant dominant pour les phases de jusant et de flot. Le décalage entre ces deux directions est déterminé grâce à la quantité $\Delta\theta$.

posantes principales (PCA) (Thomson et Emery, 2001). L'estimation des valeurs propres de la matrice de covariance des composantes de vitesses, permet d'accéder à une description assez complète du courant de marée : sa force (axe majeur), la direction du courant dominant (orientation de l'axe) et l'anisotropie du courant (ellipticité). En complément, une analyse rotationnelle des séries temporelles de vitesses radars a été appliquée pour l'identification du sens de rotation du vecteur courant. Cette technique a permis de déterminer le coefficient rotatoire r à partir de la relation suivante :

$$r = \frac{S_+ - S_-}{S_+ + S_-} \quad (1.16)$$

S_+ et S_- étant les valeurs de la puissance à la fréquence semi-diurne. r varie de -1 pour une rotation dans le sens indirect à +1 pour une rotation dans le sens direct. Dans ces deux situations, le vecteur courant décrit un cercle. La valeur $r = 0$ correspond au régime d'écoulement renversif (non-rotationnel).

1.4.2 Profil vertical de vitesse

La quantification du potentiel hydrocinétique d'un site EMR s'appuie généralement sur des vitesses de courant moyennées sur la verticale, notamment lors d'études menées à partir de modèles numériques 2D. Cette vitesse, notée $\langle V \rangle$, est liée au profil de vitesse $V(z)$ par la relation :

$$\langle V \rangle = \frac{1}{d} \int_0^d V(z) dz \quad (1.17)$$

où d est la profondeur totale, $V(z)$ la vitesse à la hauteur z au dessus du fond marin. La borne inférieure de l'intégrale devient z_0 si le profil de vitesse tend vers 0 à la hauteur $z = z_0$ (e.g. profil de vitesse logarithmique).

Dans la couche de quelques mètres au dessus du fond marin, la vitesse de courant V varie avec la hauteur z telle que (Soulsby, 1997) :

$$V(z) = \frac{v_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (1.18)$$

où v_* est la vitesse de frottement, κ la constante de Von Karman's, telle que $\kappa = 0,4$ et z_0 , la hauteur de rugosité de surface.

L'équation 1.18 est valide dans une couche d'eau comprise entre quelques centimètres au dessus du fond et jusqu'à une hauteur correspondant à 20-30% de la profondeur totale.

Afin de déterminer le paramètre z_0 , de nombreuses campagnes de mesures ont été menées en Manche, en Mer du Nord ou encore en Mer d'Irlande. Les données expérimentales récoltées ont permis à Soulsby d'établir un lien étroit entre la valeur de z_0 et la nature du fond marin (vase, boue, sable...) (Soulsby, 1983). Il recensa ainsi des valeurs variant de 0,05

à 0,7 mm. Plus tard, Soulsby proposa une relation permettant d'approximer l'évolution du profil vertical de vitesse dans toute la colonne d'eau. Cette relation s'écrit (Soulsby, 1990) :

$$V(z) = \langle V \rangle \left(\frac{z}{z_0 d} \right)^{1/\alpha} \quad (1.19)$$

α étant un coefficient empirique évalué à partir de la régression linéaire du diagramme log-log de l'évolution de la vitesse avec la profondeur.

De nombreuses études d'évaluation du potentiel hydrocinétique de sites EMR s'appuient sur cette relation. Le plus souvent, une loi de puissance en $1/7^{\text{ème}}$ ($\alpha = 7$) est privilégiée avec des valeurs de z_0 comprises entre 0 et 0,32 mm (Batten et al., 2008, Serhadhoğlu et al., 2013). Néanmoins, de récentes observations font état de profils verticaux suivant une loi en $1/8^{\text{ème}}$ ($\alpha = 8$) (Myers et Bahaj, 2010) ou $1/10^{\text{ème}}$ ($\alpha = 10$) (Rourke et al., 2010) pour des valeurs de z_0 de 0,3 mm.

Toutefois, cette relation n'est pas la seule à être utilisée. En s'appuyant sur des travaux menés par Peterson et Hennessey Jr (1978) dans le domaine éolien, l'EMEC est le premier à proposer une alternative à l'approximation de Soulsby (Legrand, 2009). En s'affranchissant de la hauteur de rugosité de surface, le Centre Européen de la Recherche Marine propose d'utiliser la vitesse de surface V_0 au dépend de la vitesse moyenne $\langle V \rangle$ telle que :

$$\tilde{V}(z) = V_0 \left(\frac{z}{d} \right)^{1/\alpha} \quad (1.20)$$

En l'absence d'information concernant la distribution du profil vertical sur un site EMR, l'EMEC préconise d'utiliser des valeurs de α comprises entre 7 et 10 (Fig. 1.11).

En utilisant l'équation 1.20, Gooch et al. (2009) ont reconstitué l'évolution du profil de vitesse à partir des données de campagnes de mesures ADCP menées sur plusieurs sites dans le Puget Sound. Les résultats ont révélés un coefficient α évoluant dans une large gamme, avec des valeurs comprises entre 3,9 à 10,2 selon les sites.

La méthode de caractérisation du potentiel hydrocinétique proposée dans cette pre-

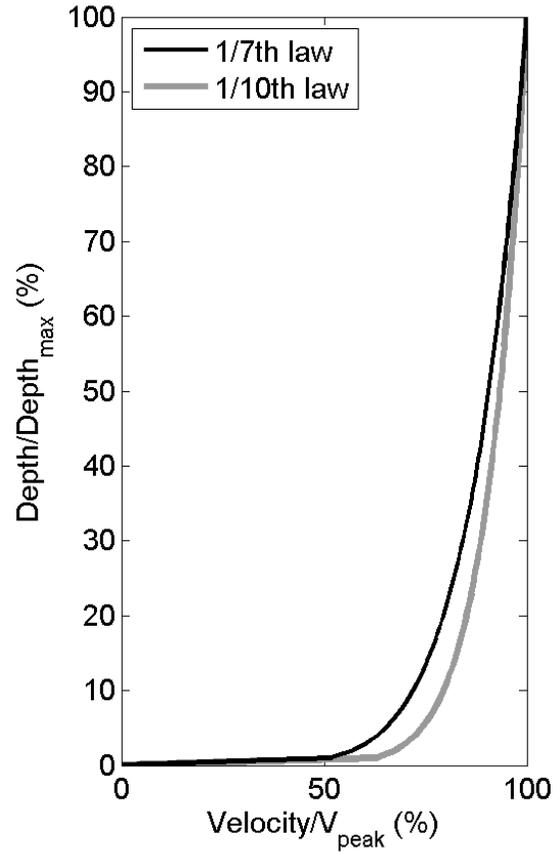


FIGURE 1.11 – Profils verticaux de vitesses obtenus par l’EMEC à partir de l’équation 1.20. Source : Legrand (2009).

mière partie de thèse reposant essentiellement sur des mesures radars de vitesses de surface, le choix s’est naturellement porté sur la seconde loi d’approximation $\tilde{V}(z)$. Toutefois, une brève comparaison des deux lois est proposée dans la section (2.3).

1.4.3 Ressource hydrocinétique

Un moyen efficace de caractériser le potentiel d’énergie tidale d’un site est de déterminer la densité de puissance cinétique P (Éq. 1) et de représenter sa distribution spatio-temporelle.

La puissance théorique P_{th} qui peut être convertie par une hydrolienne (Éq. 2), hypo-

théoriquement installée sur un site EMR peut ainsi être estimée. Le calcul de la puissance théorique, proportionnelle à P et à la surface S balayée par les pales, suppose que le récupérateur d'énergie exploite l'intégralité de la puissance présente dans l'écoulement, excluant toutes considérations de perte énergétique d'origine mécanique, thermique ou visqueuse.

Cette quantité est à comparer avec la puissance techniquement exploitable P_{exp} . La manière la plus efficace de quantifier cette grandeur est d'utiliser la courbe de puissance, assimilable à une fonction de transfert $\tilde{F}(V)$, propre à chaque dispositif de récupération telle que :

$$P_{\text{exp}} = \frac{1}{2} \rho \tilde{F}(V) \quad (1.21)$$

La courbe de puissance d'une hydrolienne donne la puissance techniquement exploitable en fonction de la vitesse de l'écoulement. Ces courbes, certifiées par un laboratoire et définies dans des conditions d'essais standards, fournissent une certaine assurance quant aux performances réelles des récupérateurs d'énergie. La courbe de puissance dispose de deux grands paramètres :

- La vitesse minimale de mise en déclenchement (cut-in-speed) : il s'agit de la vitesse de l'écoulement à partir de laquelle l'hydrolienne commence à débiter une puissance utile (c'est-à-dire de la puissance électrique).
- La puissance nominale (rated power) : cette valeur est souvent égale à la puissance électrique maximale qui peut être extraite de l'hydrolienne. Elle n'a jamais lieu à la vitesse maximale acceptable du courant marin. Peu avant d'atteindre la vitesse de mise à l'arrêt, des dispositifs sont mis en place pour freiner la vitesse du rotor (soit de manière dynamique, soit de manière hydrodynamique), ce qui peut diminuer significativement les performances de l'hydrolienne.

Dans le cadre de cette thèse, la puissance techniquement exploitable P_{exp} et la puissance théorique P_{th} ont été évaluées en considérant un ou plusieurs systèmes MCT Seagen (Fig. 0.5) hypothétiquement installés en mer d'Iroise et dans le détroit du Pas-de-Calais. La

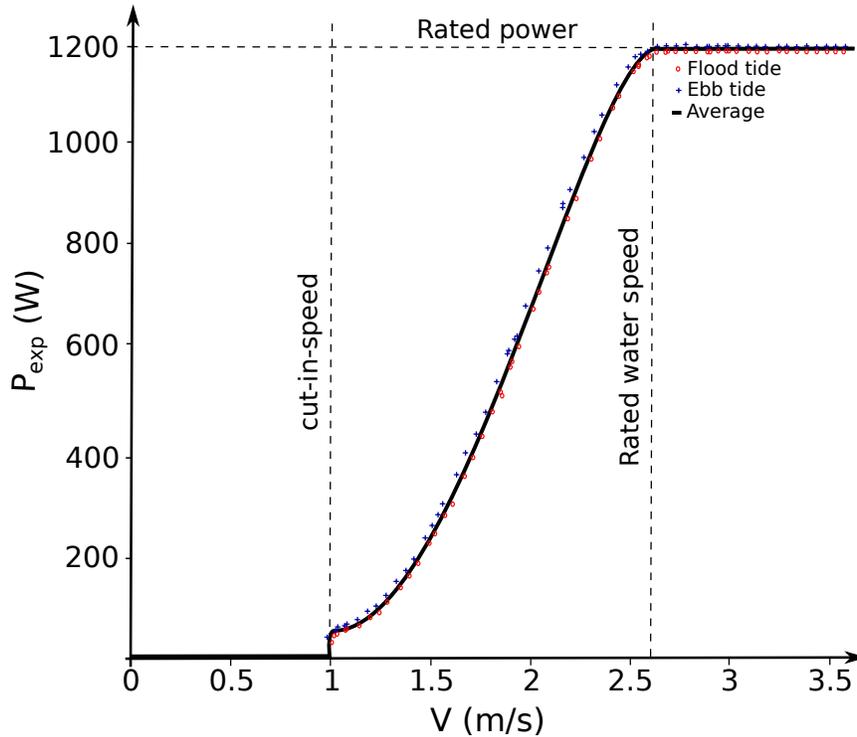


FIGURE 1.12 – Évolution de la courbe de puissance de l’hydrolienne MCT Seagen (www.marineturbines.com) en fonction de la vitesse de courant. Les cercles rouges et les croix bleus représentent les valeurs de puissances générées pendant le flot et le jusant respectivement. La puissance moyenne des deux phases de marée est affichée en trait noir continu.

courbe de puissance de ce système est présentée sur la Fig. 1.12. La vitesse de mise en déclenchement de ce dispositif à double hélices est fixée à 1 m/s. Chaque hélice, de 16 m de diamètre, fournit une puissance maximale de 600 kW pour des vitesses supérieures ou égales à 2,6 m/s. La puissance nominale générée par cette machine est alors de 1,2 MW (Rourke et al., 2010). Ce dispositif appartient à la famille de récupérateurs d’énergie tidale dite de « première génération » (Lewis et al., 2015). Cette famille requiert des pics de vitesses (moyennées dans la colonne d’eau) supérieurs à 2,5 m/s et des profondeurs comprises entre 25 et 50 m (Iyer et al., 2013).

Par ailleurs, il est très important pour l’industrie des énergies marines d’être en mesure de décrire les variations de la vitesse du courant. Les fabricants utilisent ces informations

pour optimiser la conception des hydroliennes dans le but de minimiser les coûts liés à la production d'électricité. Les investisseurs, eux, ont besoin de ces informations afin de pouvoir estimer le revenu lié à la production d'électricité. La répartition de la vitesse du courant est étudiée par classes, la fréquence d'occurrence étant exprimée directement (en pourcentage) ou de façon cumulée, ce qui permet de connaître la probabilité qu'une valeur de vitesse ne soit pas dépassée et d'identifier les vitesses prédominantes.

Dans le domaine éolien, la distribution de la vitesse du vent v est décrite par la loi de Weibull. Il s'agit d'une distribution statistique à deux paramètres :

- un paramètre de forme k qui décrit la dispersion des données, il indique une plus ou moins grande dissymétrie de la distribution des vitesses.
- un paramètre d'échelle λ , qui caractérise l'intensité du flux étudié.

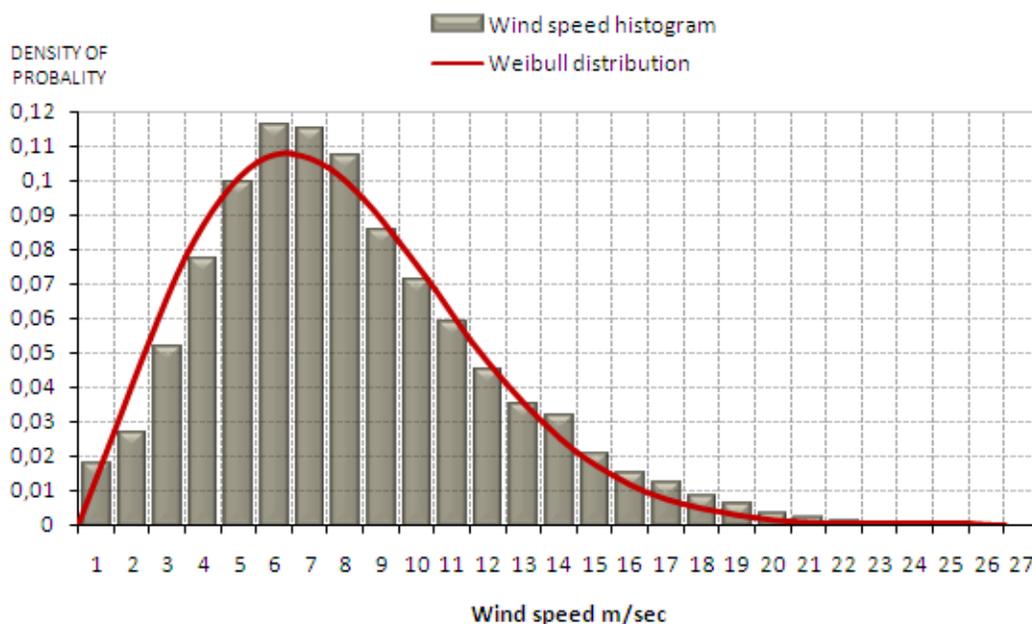


FIGURE 1.13 – Exemple d'une distribution de vitesse du vent approximée par une densité de probabilité de Weibull (courbe rouge). Source : green-power.com.pl.

La densité de probabilité de Weibull s'exprime comme :

$$f(v, k, \lambda) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{v}{\lambda}\right)^{k-1} \exp[-(v/\lambda)^k] \quad (1.22)$$

et la fonction de répartition comme :

$$F(v, k, \lambda) = 1 - \exp[-(v/\lambda)^k] \quad (1.23)$$

Les paramètres k et λ sont généralement déterminés par une régression linéaire entre les fréquences cumulées et les classes de vitesse. Dans cette thèse, la loi de Weibull a été appliquée aux données de vitesses de courant afin de tester son efficacité dans le domaine hydrolien.

Estimation du potentiel hydrocinétique par télédétection des courants et mesures in-situ

Nota : Ce chapitre a fait l'objet de trois articles scientifiques publiés dans les revues *Energy Procedia*, *International Journal of Marine Energy* et *Renewable Energy*.

2.1 Introduction

L'instauration de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte ainsi que les plans d'action qui l'accompagnent, démontrent les ambitions de la France dans la lutte contre le dérèglement climatique et affiche sa volonté de renforcer son indépendance énergétique en équilibrant ses différentes sources d'approvisionnement. Le texte doit créer l'élan d'une écologie positive afin de lever les freins, libérer les initiatives et apporter dès aujourd'hui des bénéfices tangibles à chacun.

Dans le sillage de ce programme, le Nord-Pas-de-Calais s'est engagé à devenir une des régions les plus avancées par rapport à la démarche du Grenelle. Pour ce faire, plusieurs

actions telle que la TESR (Transition Ecologique et Sociale Régionale) ont été mises en place. Depuis 2011, elle expérimente une nouvelle façon de concevoir et de conduire les politiques publiques régionales afin de favoriser l'émergence d'un modèle de développement plus durable. D'autres actions phares comme le Master Plan de la Troisième Révolution Industrielle sont menées en région. Fondé sur huit piliers, cet ouvrage, publié en octobre 2013, décrit l'ambition de la région quant à la Transition Energétique : tendre vers une énergie décarbonée à l'horizon 2050. La refonte des cartes des régions n'a pas endiguée cette ambition, la nouvelle région Hauts-de-France souhaitant élargir la Troisième Révolution Industrielle à la Picardie. Le fort potentiel éolien au large du port de Dunkerque ainsi que le potentiel d'origine tidale non négligeable dans le détroit du Pas-de-Calais contribueront à la réalisation de l'objectif fixé.

En matière d'énergies marines renouvelables, la Bretagne est souvent désignée comme la région pilote de la filière EMR en France. Elle possède plusieurs atouts indispensables à l'émergence des technologies énergétiques de la mer :

- Les 2 700 km de côtes bretonnes présentent plusieurs types de reliefs (falaises, plages, bassins naturels) et donc autant de diversité de conditions marines.
- La Région est bordée par une mer, la Manche et un océan, l'océan Atlantique.

Cet engagement dans le développement des EMR s'explique aussi par la situation énergétique de la Bretagne : elle se situe en bout du réseau électrique. Cette spécificité se traduit par une fragilité du réseau (nombreuses coupures électriques). L'indépendance énergétique du territoire devenant alors un enjeu important, le développement de la filière EMR est apparue primordial pour le territoire. Chaque technologie ayant ses propres conditions optimales de fonctionnement, la diversité de l'environnement augmente donc les possibilités d'implantations de différentes technologies.

Le développement de l'exploitation de l'énergie des courants de marée s'inscrit parfaitement dans la politique énergétique instaurée en Bretagne et dans la région Hauts-de-France. Cependant cela nécessite une estimation précise du potentiel hydrocinétique présent le long

de leurs côtes. Les conditions environnementales parfois extrêmes qui règnent en Manche, rendent difficile l'acquisition de données de vitesses de courant. La recherche des meilleurs emplacements des sites potentiels d'énergie marine renouvelable est alors mise à mal. Dans ces conditions, l'utilisation des radars HF/VHF pour la quantification du potentiel hydrocinétique représente une solution probante et innovante.

Dans ce chapitre nous présentons la méthode mise en oeuvre pour l'estimation du potentiel énergétique d'origine tidale de deux zones : la mer d'Iroise, située à l'entrée sud de la Manche, et le détroit du Pas-de-Calais. Chacune de ces zones fait l'objet d'une des deux sections. Nous tenterons de convaincre le lecteur de l'efficacité de notre approche et du couplage des mesures des courants par radar HF avec les mesures *in situ*.

2.2 Estimation du potentiel en mer d'Iroise

2.2.1 Description du site

La mer d'Iroise se situe à l'ouest de la pointe bretonne (Fig. 2.1). Sa profondeur varie de 50 à 150 m. L'Iroise est parsemée d'écueils, d'îlots et d'îles dont notamment l'île d'Ouessant, l'Archipel de Molène ou encore la Chaussée de Sein. Ses brutaux écarts de profondeurs et sa position au débouché-sud de la Manche y induisent en outre de vigoureux courants de marée circulant vers le nord-est durant le flot et s'inversant avec le jusant. Ils atteignent des vitesses remarquables (4 à 5 m/s), en particulier dans le passage du Fromveur et le Raz de Sein (Le Duff et Hily, 1999). Combinée à ces forts courants, la puissante houle de l'Atlantique-Nord y forme une mer croisée s'avérant redoutable lors des fréquentes et sévères tempêtes hivernales auxquelles l'Iroise est exposée, provoquant notamment des submersions marines à Sein.

La circulation en mer d'Iroise a été étudiée précédemment à partir de mesures *in situ* (Le Boyer et al., 2009), de modèles numériques (Muller et al., 2009, 2010) ou encore par l'analyse des mesures radars (Arduin et al., 2009, Sentchev et al., 2013). Ces études

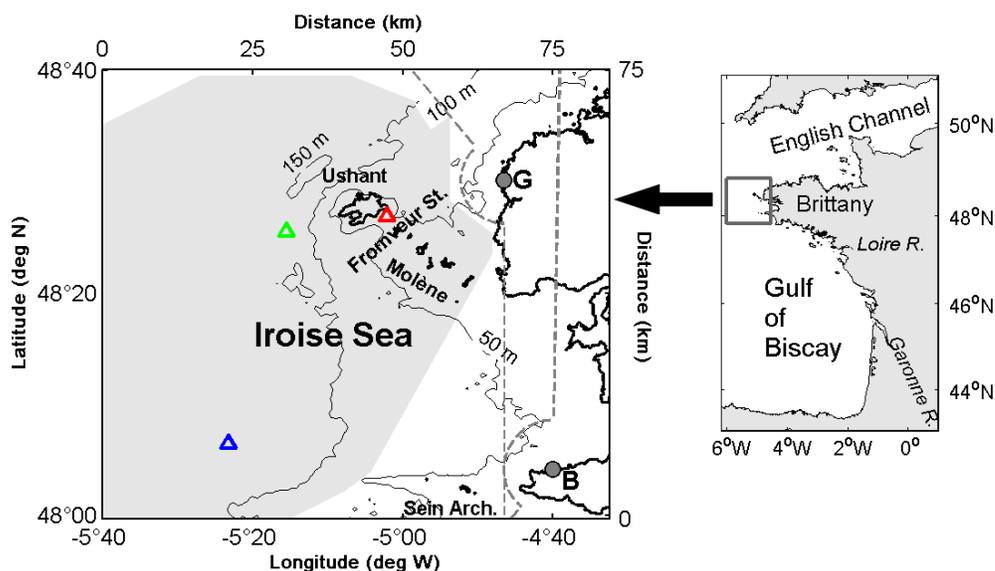


FIGURE 2.1 – Domaine d'étude en mer d'Iroise avec la couverture radar (fond et pointillé gris) et leur emplacement (cercles gris). Les triangles rouge, bleu et vert indiquent la position des ADCPs dans le passage du Fromveur, à l'ouest de l'île d'Ouessant et à la périphérie sud de la zone d'étude respectivement. L'intervalle du contour de bathymétrie est de 50 m (lignes noires). Les noms géographiques utilisés dans le texte sont également mentionnés.

montrent que l'onde de marée, provenant du Golfe de Gascogne, contourne la péninsule bretonne avant de pénétrer dans la Manche. Les variations du niveau de la mer et de l'amplitude du courant sont d'origine semi-diurne avec une très faible inégalité diurne et une forte modulation semi-mensuelle due à l'interaction des ondes principales de marée semi-diurnes (M_2 , S_2 , N_2). Enfin, malgré les vents très intenses régulièrement observés en mer d'Iroise, leurs impacts sur le courant de surface est limité, la composante de dérive de Stokes (dérive résiduelle induite par les vagues) excédant rarement 0,10 m/s (Sentchev et al., 2013).

2.2.2 Systèmes d'observations des courants de marée

Depuis août 2005, dans le cadre du projet VIGICOTE, financé par le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM), deux radars HF WERA monostatiques (émetteur et récepteur sont au même point) mesurent en temps quasi-réel l'évolution des

paramètres de surface en mer d'Iroise. Les sites radars, situés aux pointes des Caps Garchine et Brézellec, sont espacés de 50 km l'un de l'autre (Fig. 2.1). Chaque site est composé d'un réseau d'émission de 4 antennes disposées en rectangle et d'un réseau de réception de 16 antennes (Fig. 2.2) espacées équitablement sur 150 m parallèlement à la ligne de rivage. Les deux radars HF opèrent à 12,4 MHz et sont configurés de manière à atteindre une portée de 150 km avec une résolution distance-azimut de 1,5 km et 9° respectivement.

L'erreur de mesure des vitesses de courant enregistrées par radars a été estimée par le SHOM en comparant les valeurs des vitesses radars avec celles provenant de bouées dérivantes et d'ADCPs déployés au cours d'une période de 7 mois. Dans la majorité des cas,



FIGURE 2.2 – Réseau de réception de 16 antennes installé au cap Garchine. Source : www.actimar.fr.

l'écart dans l'estimation de la vitesse par ces différents systèmes n'excède pas 0,15 m/s (Le Boyer et al., 2009). La conclusion de cette étude révèle que les écarts de vitesses n'ont pas pour origine une défaillance instrumentale mais plutôt une mauvaise définition de ce que représente la « vitesse en surface », couche dans laquelle une mer agitée ou des processus tels que le cisaillement ou la dérive de Stokes peuvent perturber les mesures.

En mer d'Iroise, la contribution du courant induit par les vagues (dérive de Stokes) dans l'évaluation de la vitesse en surface a été estimée et soustrait aux enregistrements des vitesses radars. En utilisant les relations empiriques vent-courant, obtenues par des études numériques (Ardhuin et al., 2009), Sentchev et al., 2013 ont évalué l'amplitude du courant de Stokes au cours de plusieurs périodes de l'année 2007. Les paramètres du champ de vagues, requis pour l'analyse, proviennent du modèle numérique WAVEWATCH III. L'étude a révélé une amplitude moyenne et maximale du courant de Stokes de 0,05 et 0,18 m/s respectivement.

Les vitesses radiales, mesurées par les deux radars, ont été interpolées aux points de grille régulière et combinées de manière à produire des cartes vectorielles de courant dans la zone de recouvrement des radars. Des séries de vitesse dans la couche de surface (0,9 m d'épaisseur) ont ainsi été générées sur une période de 18 mois (04/2007 - 09/2008). En complément, l'évolution de la vitesse de courant dans la colonne d'eau a été quantifiée à l'aide de 3 ADCPs de 600 kHz, installés sur le fond, au sein de la couverture radars (triangles sur la Fig. 2.1).

Un ADCP a été déployé par le SHOM dans le passage du Fromveur pendant 14 jours, du 19 mars au 2 avril 1993. Les vitesses ont été enregistrées à une fréquence de 0,2 Hz (12 mesures par minute) tous les 4 m, de 6 à 52 m au dessus du fond marin. La profondeur du déploiement était de 56 m. Étant donné la puissance du courant dans le passage du Fromveur, l'acquisition de données *in situ* y est très délicate et hasardeuse. Ces mesures ADCP représentent d'ailleurs les seules données disponibles dans cette zone. Aussi, elles ont été utilisées pour la comparaison avec les vitesses obtenues par radars. Cela a nécessité la

sélection d'une période de l'année 2007 au cours de laquelle, les conditions hydrodynamiques (même coefficient et stade de marée) et l'intensité de vent (< 5 m/s) étaient similaires à celles observées durant le déploiement ADCP de l'année 1993. Une période du 7 au 18 septembre 2007 a été sélectionnée pour la comparaison. L'ensemble des profils de vitesses ont été moyennés par période de 20 minutes.

L'ADCP situé à 11 km à l'ouest de l'île d'Ouessant, a été déployé par le SHOM, à 110 m de profondeur du 16 juin au 29 juillet 2006. Les vitesses ont été enregistrées à une fréquence de 0,1 Hz (6 mesures par minute) tous les 3 m, de 4 m au dessus du fond marin jusqu'à la surface. Les profils de vitesse ont été moyennés par période de 20 minutes sur une durée totale de 40 jours (17 juin - 27 juillet).

Enfin, l'ADCP situé à la périphérie sud de la zone d'étude a été déployé par IFREMER, à 55 km du cap Brezellec, à 120 m de profondeur du 6 juin au 13 septembre 2007. Les vitesses ont été enregistrées à une fréquence de 0,2 Hz (12 mesures par minute) avec une résolution verticale de 5 m, de 8 m au dessus du fond marin jusqu'à la surface. Conséquence de la contamination du signal par la propagation des vagues (du fait de l'emplacement au large), les vitesses dans la couche de surface d'une épaisseur de 20 m ont été exclues de l'analyse. Les profils de vitesse obtenus sur une durée de 30 jours (17 juillet - 17 août 2007), caractérisée par une force de vent faible à modéré (< 8 m/s), ont été moyennés par période de 20 minutes et synchronisés avec les données radars.

2.2.3 Résultats

2.2.3.1 Variabilité spatiale et temporelle des courants

La variabilité spatiale et temporelle des courants a été quantifiée en appliquant la méthode d'analyse des composantes principales PCA (Thomson et Emery, 2001). Cette méthode a permis d'établir les paramètres synthétiques des ellipses de courant (Fig. 2.3). Celles-ci représentent le courant de marée en période de vive-eau (moyenne sur de multiples

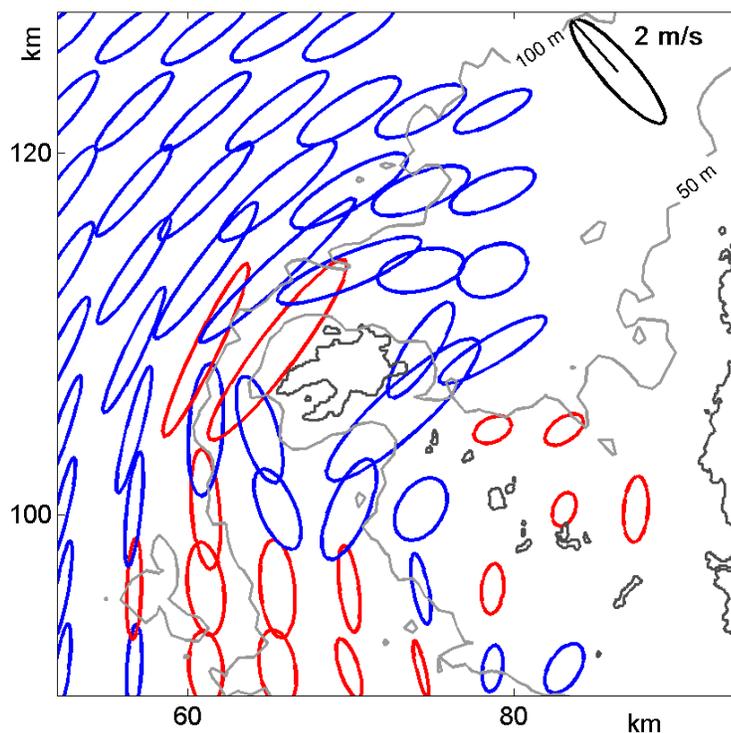


FIGURE 2.3 – Ellipses de courant en période de vive-eau. Une ellipse sur quatre est représentée. Les ellipses rouges et bleus indiquent la sens de rotation du courant dans le sens direct et indirect respectivement.

période de 7 jours pendant un an). L'orientation des ellipses indique clairement que l'onde de marée se propage du Golfe de Gascogne vers la Manche, mais également que la propagation de l'onde de marée est gouvernée par la topographie et en particulier par le trait de côte. L'axe majeur des ellipses est aligné avec les contours de profondeurs.

La forte excentricité des ellipses au sud de l'île d'Ouessant et dans la région peu profonde entre les îles Molène et la côte bretonne révèle une anisotropie du champ de vitesse. Ce phénomène peut s'expliquer par l'interaction du courant avec les îles, laquelle amplifie l'effet de friction au voisinage du fond (Defant, 1961). La longueur des demi-axes majeurs des ellipses de courant fournit une information sur la force du courant de marée et révèle les régions où l'écoulement est le plus énergétique : le nord-ouest de l'île d'Ouessant et le passage du Fromveur. Les ellipses rouges et bleus indiquent le sens de rotation du courant :

sens direct et indirect respectivement. Dans la majorité du domaine, le courant est entraîné dans le sens indirect. Cette caractéristique est liée à la distribution spatiale du gradient de pression et de ses variations lors de la propagation de l'onde de marée. Celle-ci, en provenance du Golfe de Gascogne, contourne l'île d'Ouessant dans le sens indirect (Lux et al., 2010). La force de Coriolis, agissant sur la propagation de ce flux, renforce la rotation du courant dans ce sens (Defant, 1961).

Les valeurs négatives maximales du coefficient rotatoire r ($> -0,9$) sont observées dans la partie nord-est de la zone d'étude (non montré) alors que les valeurs positives maximales de r ($> 0,7$) sont observées dans deux régions : autour des îles d'Ouessant et de Molène. Dans la zone peu profonde, à l'est des îles Molène, la friction sur le fond génère une rotation

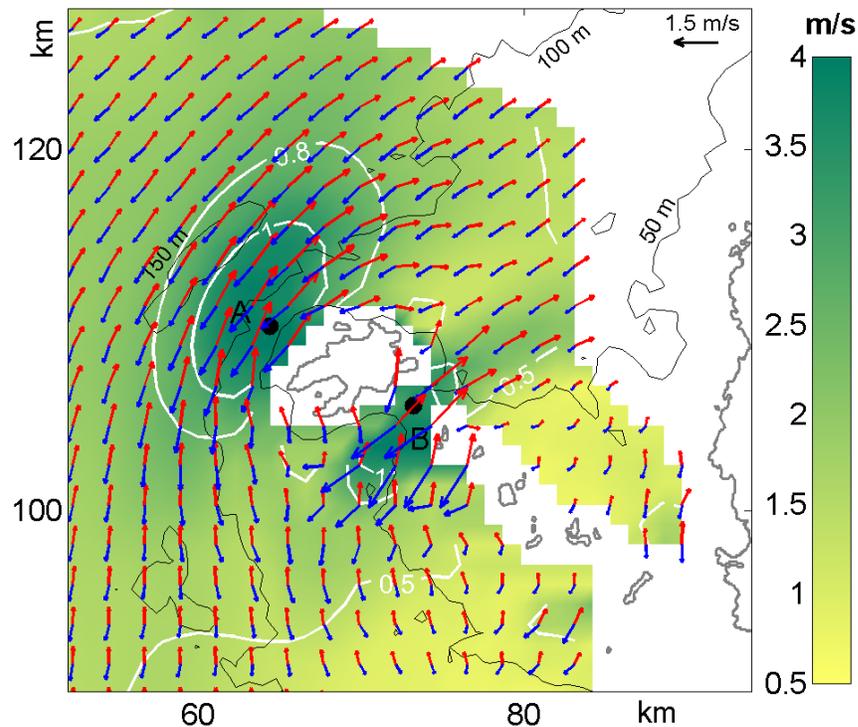


FIGURE 2.4 – Amplitude et direction du courant dominant de flot (rouge) et de jusant (bleu) au cours d'une période de vive-eau. La vitesse maximale en surface pendant la période d'étude est indiquée par le code couleur, les vitesses moyennes annuelles sont indiquées par les contours blancs. Les lettres A et B montrent les points de grille où les courants les plus forts sont observés.

du vecteur courant dans le sens direct. La plus vaste zone abritant un courant orienté dans ce sens se situe au sud de l'île d'Ouessant et de Molène. Ici, la profondeur totale excède 50 m, ainsi l'orientation du vecteur courant ne peut être directement induite par les forces de frictions qui règnent à proximité du fond marin. L'un des mécanismes possibles est l'interaction de l'onde de marée avec l'île d'Ouessant, laquelle génère une activité tourbillonnaire qui est advectée vers l'ouest, en longeant la périphérie sud de l'île d'Ouessant et de Molène, pendant la transition jusant/flot.

La distribution du coefficient de rotation avec un changement du signe de rotation des vecteurs courant autour des îles, est un des phénomènes les plus remarquables de la circulation de marée en mer d'Iroise.

La distribution de la vitesse moyenne et maximale montre chacune une variation spatiale significative allant de 0,5 à 2 m/s pour la vitesse moyenne (contours blancs sur la Fig. 2.4) et de 0,75 à 4 m/s pour la vitesse maximale (code couleur sur la Fig. 2.4). Le fort gradient de bathymétrie dans la partie nord-est du site d'étude et la présence des îles entraînent une accélération de l'écoulement qui tend à resserrer les lignes de courant générant des vitesses maximales à l'ouest de l'île d'Ouessant et dans le passage du Fromveur. Dans ces deux zones, la vitesse moyenne annuelle excède 1,5 m/s et la vitesse maximale atteint 4 m/s.

Dans la majorité du domaine, la direction du courant dominant est régit par la bathymétrie. Cependant, au sud et à l'est de l'île d'Ouessant, un écart significatif de la direction du courant de flot et de jusant est observé (Fig. 2.4). L'asymétrie de direction permet de quantifier la déviation de l'écoulement entre ces deux phases de marée. La Fig. 2.5 représente l'évolution de $\Delta\theta$ dans le domaine d'étude. Dans la partie nord-ouest du domaine, $\Delta\theta$ évolue de 0° à 10° , révélant un écoulement quasiment unidirectionnel entre le flot et le jusant. À l'est et au sud de l'île d'Ouessant, des valeurs élevées de $\Delta\theta$ ($> 40^\circ$) sont observées avec une valeur atteignant 90° à l'extrémité sud de l'île. [Sentchev et al. \(2013\)](#) ont constaté la présence de tourbillons transitoires dans ce secteur pouvant justifier un tel écart dans la

direction du courant dominant entre les phases de flot et de jusant. De telles valeurs d'asymétrie peuvent engendrer des déséquilibres conséquents dans la puissance générée par une hydrolienne. En utilisant un modèle numérique, [Frost et al. \(2014\)](#) ont notamment évalué l'impact d'un écoulement bidirectionnel sur les performances d'un récupérateur d'énergie. Les auteurs ont montré qu'un $\Delta\theta$ de 10° et 20° entraîne une diminution du rendement de l'hydrolienne de 7,5% et 29% respectivement.

2.2.3.2 Occurrences de vitesse

Les occurrences de vitesse de 1 m/s ; 1,5 m/s et 2 m/s sont présentées sur la Fig. 2.6. La comparaison entre les zones à fort potentiel énergétique (nord-ouest de l'île d'Ouessant et le passage du Fromveur) montre que pour une valeur de vitesse donnée, la distribution spatiale dans le secteur nord-ouest est plus étendue. Ici, la vitesse de 1 m/s est excédée plus

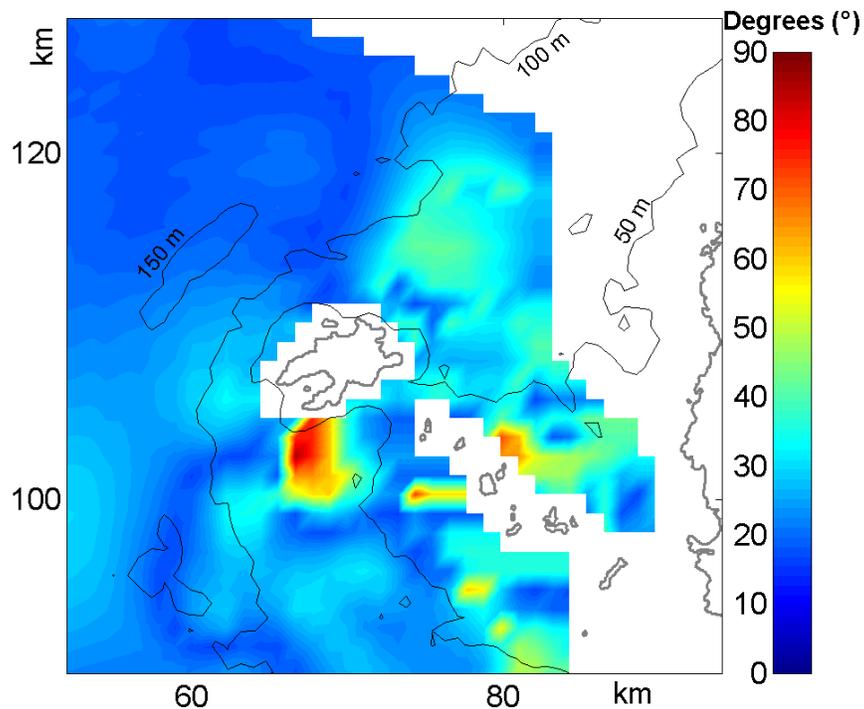


FIGURE 2.5 – Asymétrie de la direction du courant dominant $\Delta\theta$ entre les phases de flot et de jusant.

de 60% du temps ; 1,5 m/s, plus de 30% du temps et 2 m/s, 20% du temps. Dans le passage du Fromveur, la zone des vitesses élevées est plus limitée spatialement. Cependant, pour ces mêmes valeurs, les occurrences de vitesse sont plus élevées : 70%, 40% et 30% du temps respectivement.

La Fig. 2.7 montre la densité de probabilité et les occurrences cumulées des vitesses en deux points de grille où les courants les plus forts sont observés (points A et B, voir

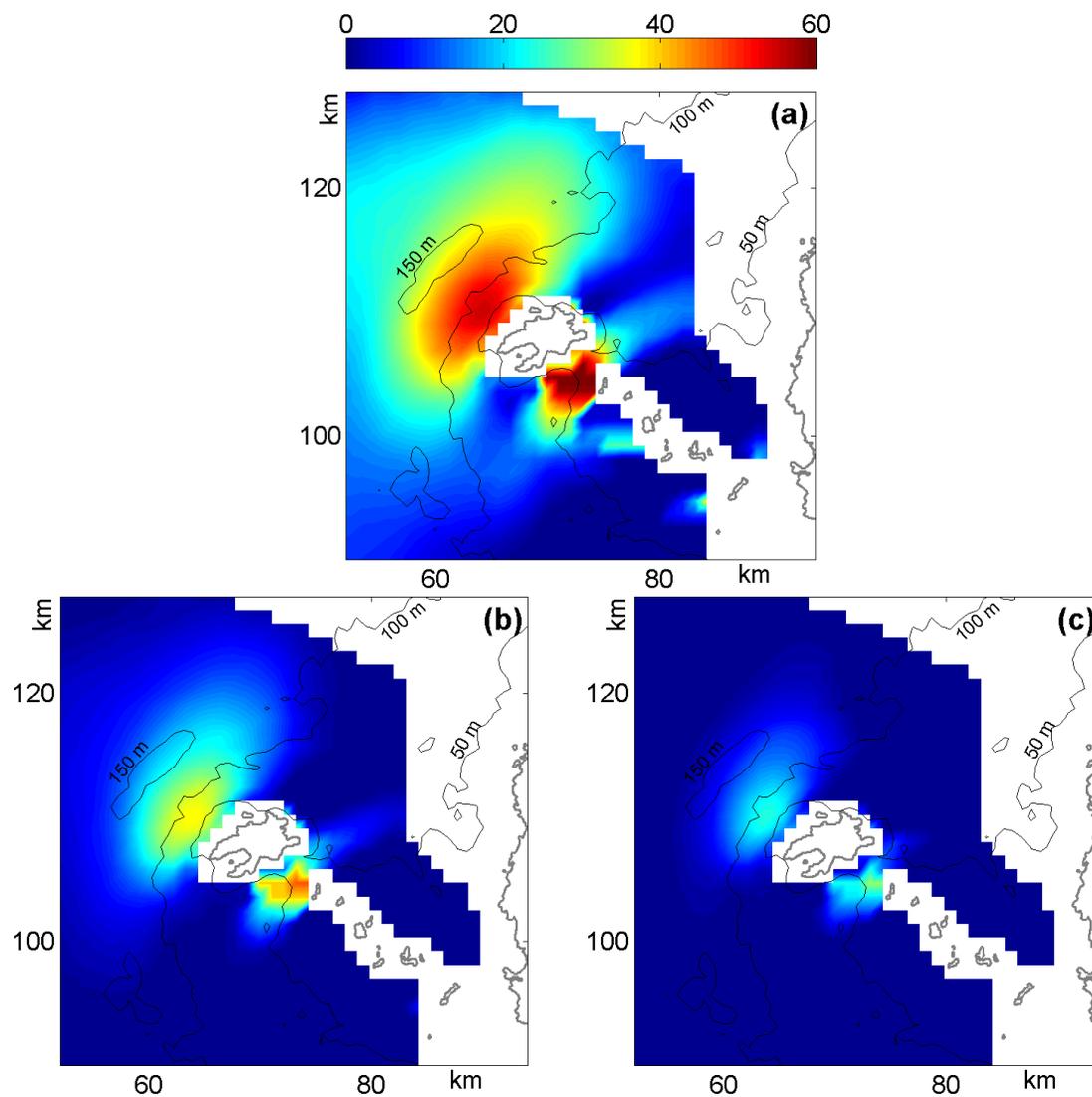


FIGURE 2.6 – Occurrences de vitesse pour les valeurs : 1 m/s (a) ; 1,5 m/s (b) et 2 m/s (c).

Fig. 2.4 pour leur emplacement). Au nord-ouest (point A), la densité de probabilité suit grossièrement la distribution de Weibull. Le maximum de 50% est atteint pour la vitesse de 0,7 m/s puis la distribution décroît graduellement pour les vitesses de 1 à 4 m/s (Fig. 2.7a). Dans le passage du Fromveur (point B), la densité de probabilité est plus homogène. Le maximum de probabilité est plus faible (45 %) pour la même valeur de vitesse (0,7 m/s) (Fig. 2.7b). Cette homogénéité dans la répartition des vitesses s'explique par une variation semi-mensuelle de la vitesse de courant plus équilibrée dans le Fromveur qu'au nord-ouest de l'île d'Ouessant. Dans cette zone, les mesures radars ont montré que le ratio des vitesses de vive-eau sur les vitesses de morte-eau est proche de 4 contre un ratio de 2 dans le passage du Fromveur. [Sentchev et al. \(2013\)](#) ont justifié cette tendance par la présence des ondes

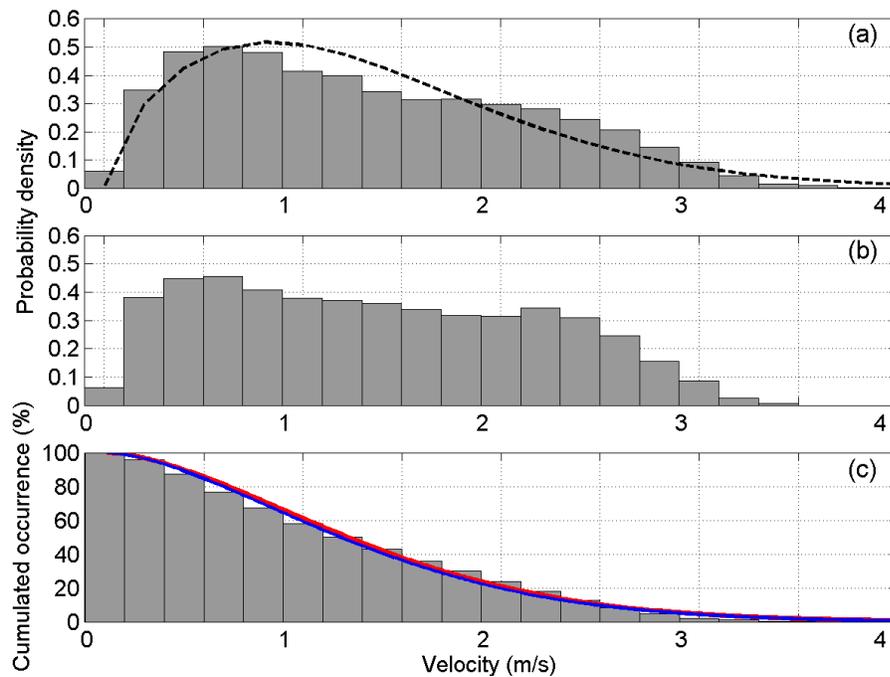


FIGURE 2.7 – Densité de probabilité des vitesses enregistrées en deux points où les vitesses maximales ont été observées : point A (a) et B (b). Les occurrences cumulées de vitesse du point A sont représentées en (c). La distribution des occurrences cumulées est approximée aux points A et B par la fonction de répartition de Weibull (courbe rouge et bleu). Les paramètres k et λ sont donnés dans le texte. La courbe en pointillé sur la figure (a) représente l'approximation de Weibull au point A.

six-diurnes (M_6 , $2MS_6$, $2MN_6$), dont l'amplitude est supérieure à celles des ondes quart-diurnes.

Les occurrences cumulées de vitesse (Fig. 2.7c) sont très similaires pour les deux emplacements. Dans les deux cas, la fonction de répartition de Weibull est parfaitement reproduite avec une paramètre d'échelle $\lambda = 1,5$ à chaque emplacement et un paramètre de forme $k = 1,6$ et $1,7$ au point A et B respectivement.

2.2.3.3 Asymétrie des vitesses de courant

Bien que l'orientation des ellipses, les occurrences de vitesse, la force du courant et la polarisation du vecteur vitesse soient similaires au nord-ouest de l'île d'Ouessant et dans le passage du Fromveur, une différence notable subsiste entre ces deux zones. Il s'agit de l'asymétrie a des vitesses de courant.

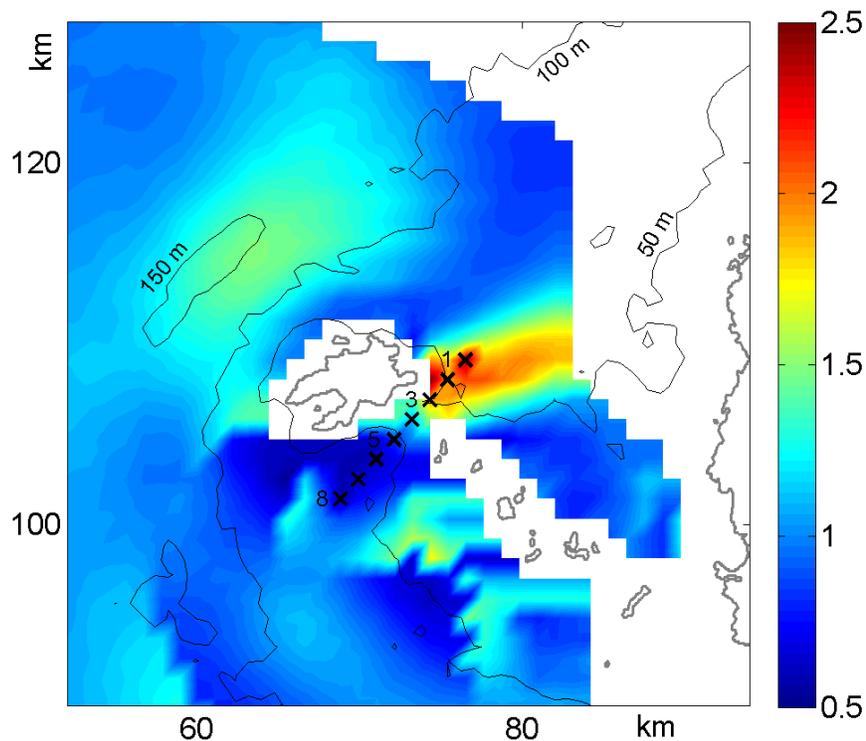


FIGURE 2.8 – Distribution spatiale de l'asymétrie a des vitesses de courant. Les croix noires indiquent la position des points de grille sélectionnés pour une analyse détaillée.

Celle-ci varie dans une large gamme, allant de 0,5 à 2,5 avec des valeurs $a > 1$ à l'ouest et $a < 1$ au sud de la zone d'étude (Fig. 2.8). La plus forte variation de l'asymétrie est observée dans le passage du Fromveur. Ici, l'asymétrie atteint 2,5 à l'extrémité nord du passage, révélant des vitesses de flot bien supérieures à celles de jusant. À mesure que l'on se déplace dans le Fromveur, l'asymétrie décroît jusqu'à une valeur proche de 1 au centre du passage, où les amplitudes de courant de flot et de jusant sont quasiment identiques. Une autre asymétrie de la courbe de vitesse apparaît à l'extrémité sud du passage. Ici et dans une zone étendue au sud du Fromveur, l'asymétrie atteint 0,5 révélant des courants de jusant deux fois plus forts que les courants de flot.

Pour illustrer ce changement radical du régime de l'écoulement sur une très faible distance, les séries de vitesse enregistrées sur deux emplacements à proximité du centre du Fromveur (emplacements 3 et 5 sur la Fig. 2.8) sont présentés sur la Fig. 2.9. Les valeurs de l'asymétrie révèlent une forte variation de 1,9 à 0,8 entre ces deux points distants de 2,5 km. La Fig. 2.8 montre des écarts de vitesse sur ces deux points de plus de 2 m/s en période de jusant alors que les vitesses de flot y sont du même ordre de grandeur. Les emplacements

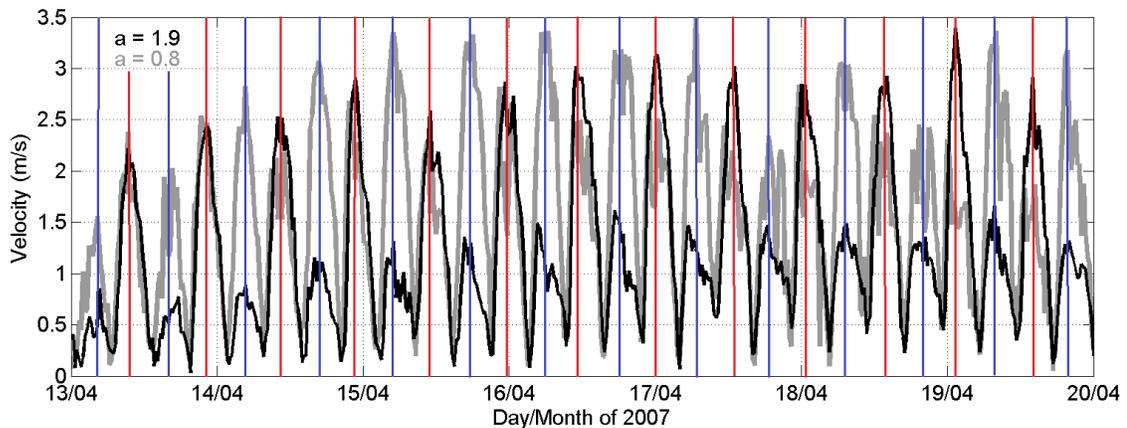


FIGURE 2.9 – Évolution temporelle de l'amplitude de courant en deux points de grille à proximité du centre du Fromveur : emplacements 3 (noir) et 5 (gris). La position des points de grille est représentée par les croix noires sur la Fig. 2.8. La valeur d'asymétrie des deux emplacements est indiquée. Les lignes rouges et bleues montrent la position des pics de vitesse observés en flot et en jusant respectivement.

1 et 8, distants de 9 km, indiquent les zones d'asymétrie maximale où les valeurs de 0,5 et 2,5 ont été observées. Ici, les écarts d'amplitudes de vitesse sont encore plus importants. Il est intéressant de souligner qu'une telle variation d'asymétrie n'a été relevée dans aucune publication scientifique.

L'asymétrie des vitesses de courant révèle la complexité de la propagation de l'onde de marée aux alentours de l'île d'Ouessant. Les différentes propriétés de l'écoulement de marée qu'on trouve en région côtière peuvent expliquer de telles variations d'asymétrie. Une première explication est l'interaction entre les composantes principales de marée (M_2 , S_2 ...) et les harmoniques d'ordre supérieur (M_4 , M_6 , MS_4 ...), laquelle génère des termes non-linéaires dans l'expression mathématique des ondes résultantes. [Speer et Aubrey \(1985\)](#) ont montré l'existence d'une relation particulière entre les phases des ondes en interaction :

$$2\Phi_{M_2} - \Phi_{M_4} \simeq \Phi_{M_2} + \Phi_{S_2} - \Phi_{MS_4} \simeq \Phi_{M_2} + \Phi_{N_2} - \Phi_{MN_4} \quad (2.1)$$

Il a été établi que la différence de phase entre les ondes de marée semi-diurne et quart-diurne est étroitement liée à l'asymétrie ([Proudman, 1953](#), [Prandle et Player, 1993](#), [Le Provost, 1991](#)). En particulier, la relation de phase entre l'onde principale M_2 et son harmonique d'ordre supérieur M_4 peut être utilisée pour déterminer le degré d'asymétrie à travers la l'équation :

$$\gamma = 2\Phi_{M_2} - \Phi_{M_4} \quad (2.2)$$

où Φ_{M_2} et Φ_{M_4} sont les phases (en degrés) des ondes M_2 et M_4 respectivement ([Pingree et Griffiths, 1979](#), [Friedrichs et Aubrey, 1988](#)). L'évolution de la courbe de vitesse est dite symétrique ($a = 1$) dans le cas où $\gamma = 90^\circ, 270^\circ$ alors que l'asymétrie des vitesses est maximale lorsque $\gamma = 0^\circ, 180^\circ$.

Afin de vérifier cela, une analyse harmonique des séries temporelles de vitesse le long du passage du Fromveur a été effectuée. Les résultats indiquent la présence de toutes les composantes de marée d'origine astronomique dans le spectre (Fig. 2.10). L'interaction de

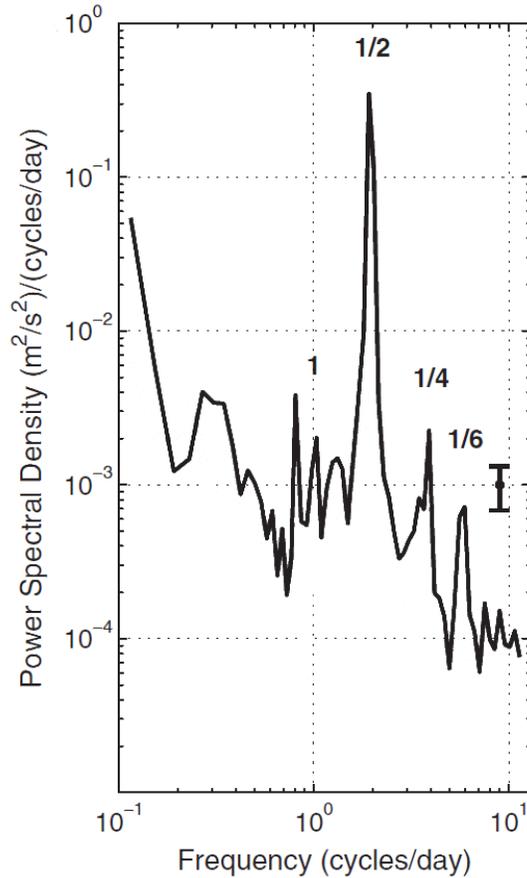


FIGURE 2.10 – Spectre de l'énergie cinétique obtenu sur la période avril-mai 2007 à partir des vitesses radars (extrait de [Sentchev et al., 2013](#)). Les nombres représentent les périodes dominantes de la marée (en jours). La barre d'erreur indique un intervalle de confiance de 95%.

ces ondes entre elles, produit un déséquilibre de la courbe de vitesse créant une asymétrie permanente. La Fig. 2.11 montre la relation de phases γ entre les ondes M_2 et M_4 (courbe noire) et l'asymétrie des vitesses de courant (courbe grise) calculée sur chacun des huit points de grille dans le passage du Fromveur (voir la Fig. 2.8 pour les emplacements). Trois sous-régions ont été identifiées par différentes couleurs : le nord, le sud et le centre du Fromveur. Dans les secteurs nord et sud, la marée est dominée respectivement par le flot et le jusant, tandis que dans la partie centrale du passage, la courbe de vitesse est équilibrée ($a \simeq 1$). L'évolution de l'asymétrie et la relation de phase γ sont concordantes. Dans les

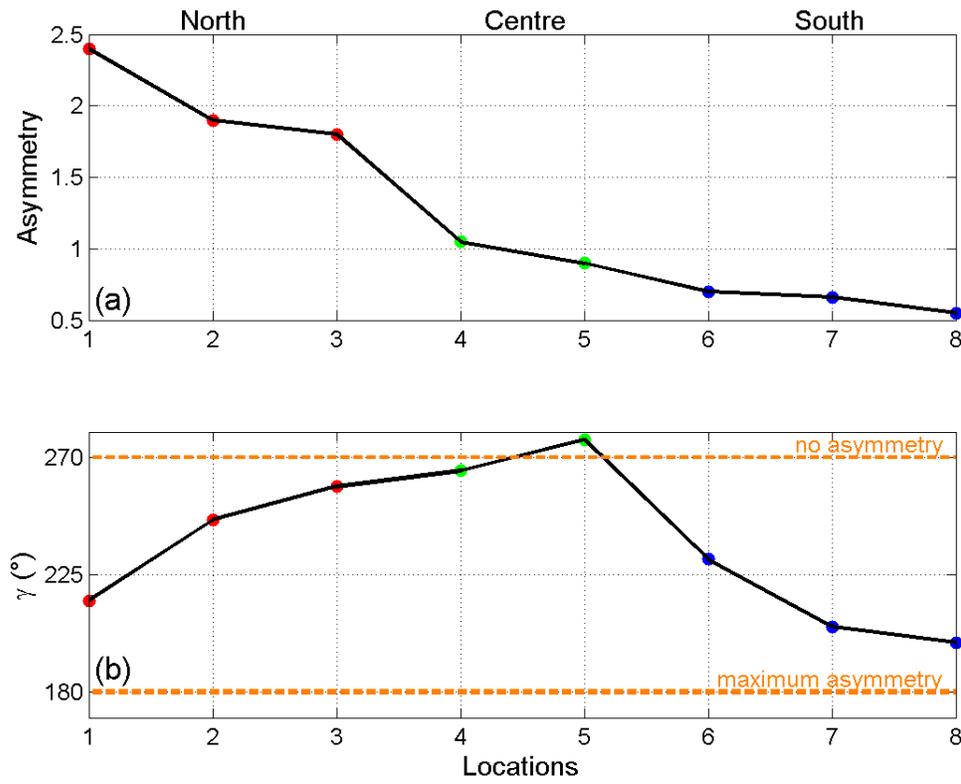


FIGURE 2.11 – Évolution de l’asymétrie a des vitesses de courant (a) et de la relation de phase γ entre les ondes de marée M_2 et M_4 (b) le long du passage du Fromveur. Les points rouges et bleus indiquent les sites où la marée est dominée par le flot et le jusant respectivement. Les points verts montrent les emplacements où les courbes de vitesse sont quasiment équilibrées ($a \simeq 1$).

régions nord et sud, le maximum d’asymétrie est atteint lorsque γ tend vers 0° (ou 180°). D’autre part, dans le centre du Fromveur, les amplitudes de courant de flot et de jusant sont équivalentes avec γ proche de 270° .

Une autre explication de la distribution de l’asymétrie des vitesses de courant autour de l’île d’Ouessant réside dans la distribution spatiale de la composante résiduelle de courant. Celle-ci est une autre conséquence de l’interaction non-linéaire des composantes de marée entre elles. Ces interactions engendrent la création d’une résiduelle, c’est à dire d’une composante non-oscillante. Il s’agit donc d’un courant permanent créé par la marée. Pour illustrer la présence de ce courant, considérons le cas simple de l’interaction d’une onde avec

une seconde onde du même type dont la vitesse $u_1(t)$ s'écrit :

$$u_1(t) = u_1 \cos(\omega t + \phi) \quad (2.3)$$

L'interaction de deux ondes de type $u_1(t)$ donne :

$$u_1(t).u_1(t) = u_1 \cos(\omega t + \phi).u_1 \cos(\omega t + \phi) = \frac{u_1^2}{2} \cos[2(\omega t + \phi)] + \frac{u_1^2}{2} = u_2(t) + u_0 \quad (2.4)$$

Le terme u_0 représente une vitesse qui vient s'ajouter à la vitesse de courant résultant de l'interaction $u_2(t)$. En particulier, u_0 va contribuer à abaisser ou ré-hausser la courbe de vitesse et donc affecter le coefficient d'asymétrie.

La Fig. 2.12 montre la distribution spatiale du courant résiduel dans la zone d'étude. La distribution est similaire à celle établie pour l'asymétrie des vitesses de courant (Fig. 2.8). L'amplitude du courant résiduel varie de 0,05 à 0,4 m/s avec des valeurs maximales atteintes au nord et au sud du Fromveur. Au centre du Fromveur, où la courbe de vitesse est quasiment symétrique, l'amplitude du courant résiduel est plus faible (0,10 m/s).

2.2.3.4 Profils de vitesse et comparaison vitesses radars versus ADCP

À partir des données ADCP collectées dans la zone de couverture radars, les profils de vitesse moyennés par période de 20 minutes ont été générés. Les profils sont regroupés par période d'une heure, correspondant à des stades successifs de marée. L'étude s'est portée sur trois périodes : celle contenant le pic de vitesse et sur deux périodes de part et d'autre de la période de vitesse maximale. Les profils moyens ont été générés pour les phases de vive-eau/mort-eau et de flot/jusant et approximés par la loi de puissance $\tilde{V}(z) = V_0 \left(\frac{z}{d}\right)^{1/\alpha}$ (Fig. 2.13).

Dans le passage du Fromveur, la meilleure approximation des profils verticaux a été obtenue pour $\alpha = 7,5$ en moyenne. Globalement les valeurs de α obtenues entre les différents stades de marée sont très proches. L'étude a révélé des valeurs moyennes pendant la

phase de flot de 7,7 contre 7,5 en jusant. L'écart est légèrement supérieur si on compare le coefficient moyen α obtenu en vive-eau et morte-eau : 7,8 contre 7,1 respectivement (Tab. 2.1).

La valeur du coefficient α la plus élevée est atteinte pendant la période du pic de vitesse, tous stades de marée confondus. La comparaison des valeurs obtenues au cours des trois périodes, à partir des données des deux autres ADCPs installés plus au large, a révélé une grande similarité. Compte tenu de cette observation, les valeurs α ont été moyennées et regroupées sous l'appellation « Offshore » (Offs. dans le Tab. 2.1) pour chaque période d'une heure.

À l'ouest de l'île d'Ouessant et à la périphérie sud de la zone d'étude, la valeur moyenne du coefficient α est de 5,8. Cette valeur est particulièrement représentative de l'approximation du profil de vitesse généré pendant la phase de vive-eau. L'analyse a montré qu'en

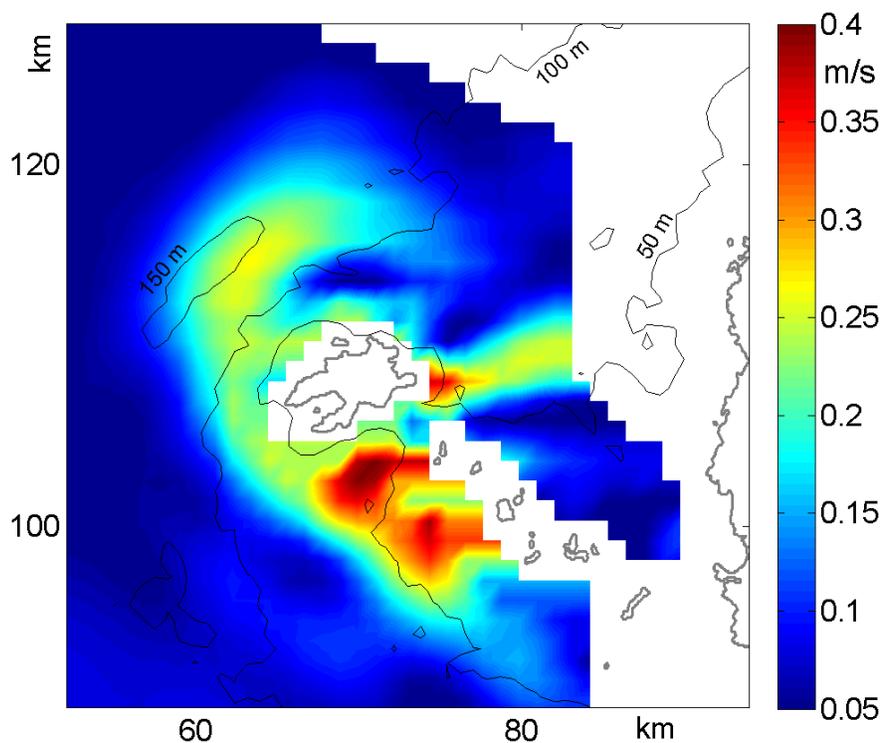


FIGURE 2.12 – Distribution spatiale du courant résiduel autour de l'île d'Ouessant.

morte-eau, quand l'amplitude de vitesse est faible, la forme des profils verticaux est quasiment linéaire, engendrant des valeurs α nettement supérieures à celles obtenues pendant les phases de flot, de jusant et de vive-eau. Ainsi, ces valeurs élevées du coefficient α ont été exclues (arbitrairement) lors du calcul du α moyen.

Contrairement à ce qui a été observé dans le passage du Fromveur, les valeurs maximales de α en régions profondes ($> 100\text{m}$) sont atteintes 1 heure avant le pic de vitesse.

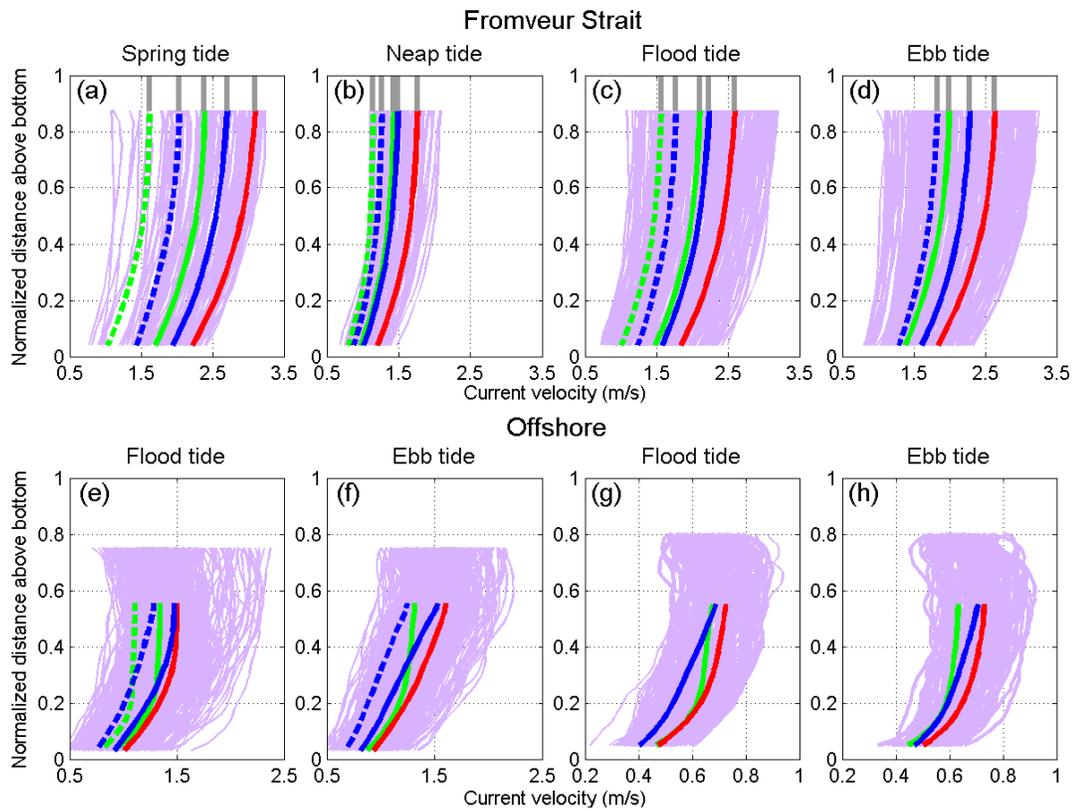


FIGURE 2.13 – Profils verticaux de vitesse de courant correspondant aux phases de vive-eau/morte-eau (a-b) et flot/jusant (c-d), obtenus à partir des mesures ADCP effectuées dans le centre du passage du Fromveur. Les profils de l'écoulement de flot et de jusant, provenant des mesures ADCP de 2006 et 2007 sont montrés en (e-f) et (g-h) respectivement. Les profils moyens au cours de la période du pic de vitesse sont représentés en rouge ceux obtenus une heure avant et après le pic de vitesse sont représentés en vert et bleu respectivement. Les profils obtenus deux heures avant et après le pic de vitesse sont tracés en pointillé. Les profils initiaux (moyennés sur 20 minutes) sont tracés en violet. L'extrapolation de l'évolution de la vitesse dans la couche de surface est représentée en gris.

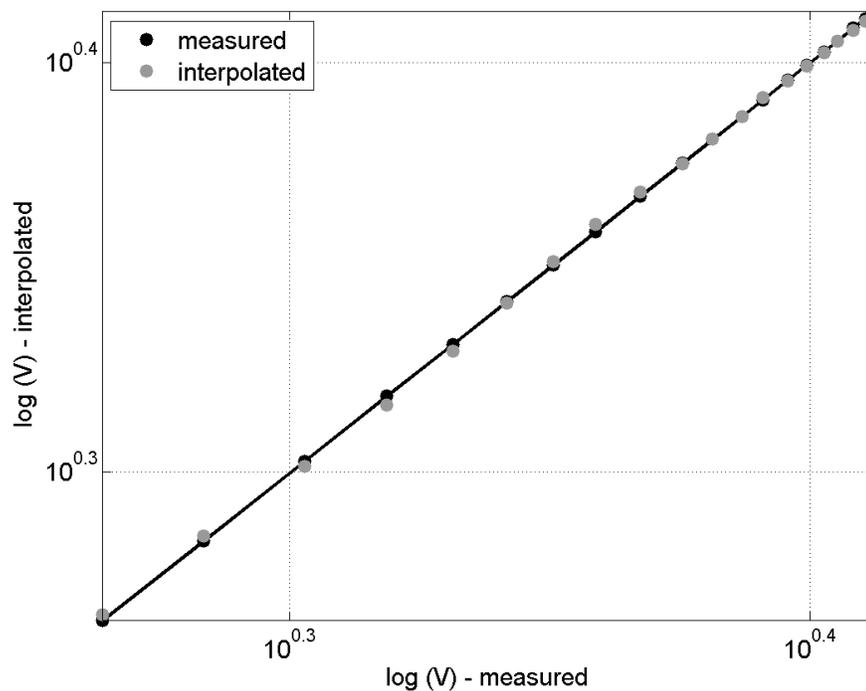


FIGURE 2.14 – Exemple de diagramme log-log obtenu lors de l’approximation du profil vertical de vitesse mesuré par ADCP pendant la phase de flot, dans le passage du Fromveur. Les vitesses observées sont représentées par des cercles noirs, et les vitesses approximées, par des cercles gris.

Ensuite, α décroît graduellement jusqu’à atteindre sa valeur minimale une heure après le pic de vitesse (Tab. 2.1).

	Pic vel. -1h		Pic vel.		Pic vel. +1h		$\langle \alpha \rangle$	
	Fromv.	Offs.	Fromv.	Offs.	Fromv.	Offs.	Fromv.	Offs.
Flot	7,6	6,9	7,8	5,9	7,7	4,7	7,7	5,8
Jusant	7,3	6,9	7,3	5,5	7,5	4,9	7,5	5,7
V.E.	7,7	6,9	7,9	5,5	7,8	5,1	7,8	5,8
M.E.	7	-	7	-	7,3	-	7,1	-
$\langle \alpha (1h) \rangle$	7,4	6,9	7,5	5,6	7,6	4,9	7,5	5,8

TAB. 2.1 – Valeurs du coefficient α obtenus par approximation des profils de vitesse pour trois périodes spécifiques autour du pic de vitesse (Pic vel.), pour les phases de flot, de jusant, de vive-eau (V.E.) et de morte-eau (M.E.) dans le passage du Fromveur (Fromv.) et pour les deux emplacements de grandes profondeurs (Offs.).

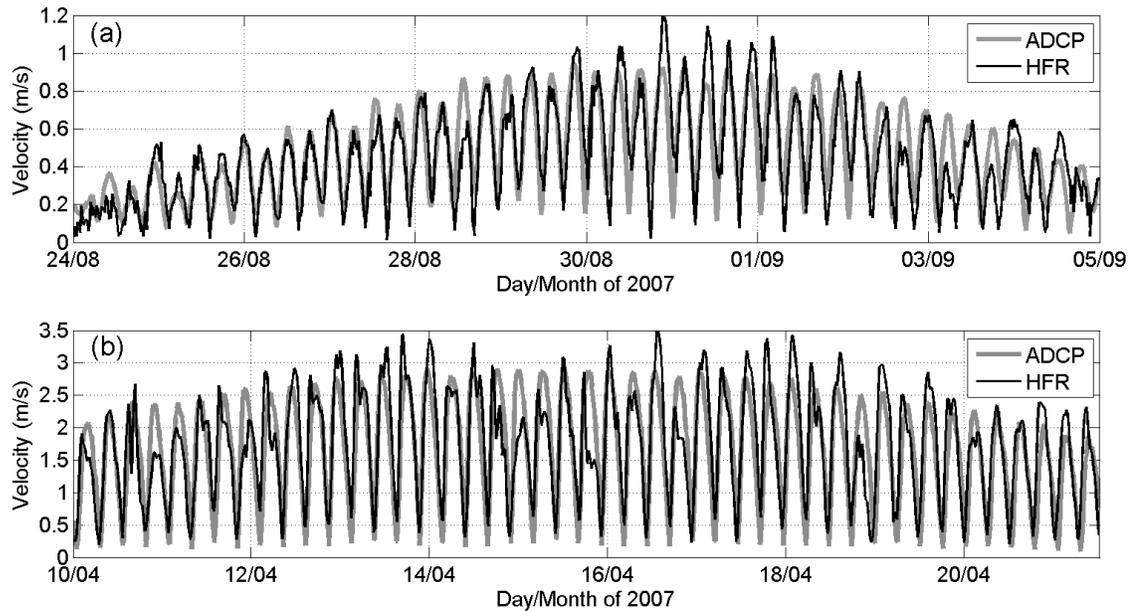


FIGURE 2.15 – Évolution de la vitesse moyenne dans la colonne d’eau obtenue par ADCP (gris) et de la vitesse de surface enregistrée par radars (noir) sur deux sites d’installation ADCP : au centre du Fromveur (a) et à l’extrémité sud de la zone d’étude (b). La période en (a) a été limitée à 12 jours pour la clarté de la présentation.

Enfin, les valeurs du coefficient α obtenues sur les trois emplacements ont été estimés avec une précision (écart-type) $\Delta\alpha$ de 1,4. D’autre part, l’écart moyen entre la vitesse mesurée à chaque niveau de profondeur et la vitesse approximée par la loi de puissance est très faible (de l’ordre de 2%). Le diagramme log-log de la Fig. 2.14, représentant la vitesse approximée en fonction de la vitesse mesurée, appuie cette conclusion.

L’évolution temporelle des séries de vitesses moyennées sur la verticale obtenues par ADCP et des séries de vitesses de surface enregistrées par radars ont été comparées sur deux sites d’installation ADCP : au centre du Fromveur et à l’extrémité sud de la zone d’étude (Fig. 2.15). La comparaison montre une bonne concordance avec un déphasage quasi-nul et un fort degré de corrélation (0,86 pour le point au sud et 0,85 dans le Fromveur).

La Fig. 2.16 montre la dispersion des valeurs de vitesses obtenues par ADCP et radars pour chaque emplacement. Le coefficient directeur de la régression linéaire (droite rouge sur

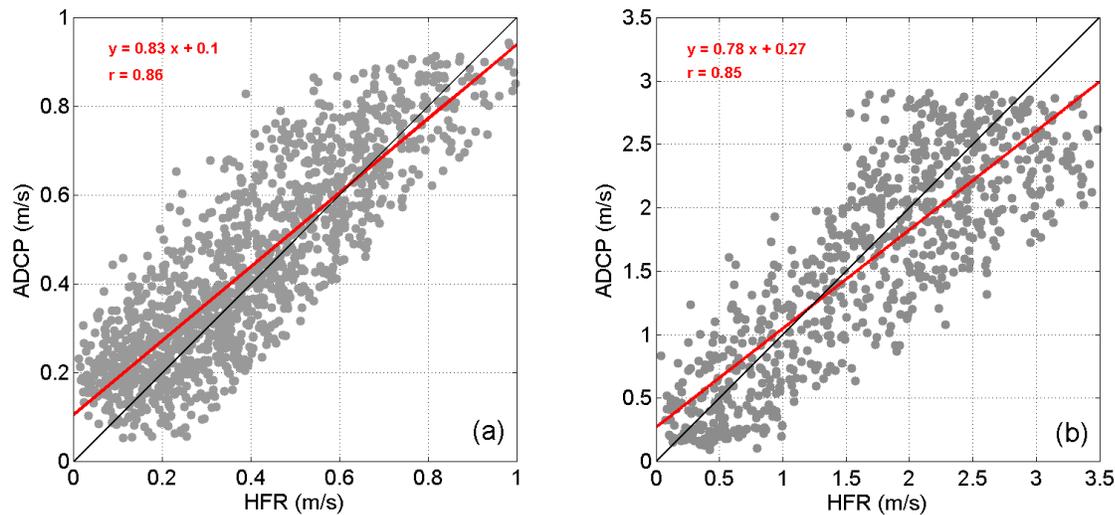


FIGURE 2.16 – Nuage de points des vitesses moyennées sur la verticale et des vitesses de surface obtenues au sud de la zone d’étude (a) et dans le Fromveur (b). Chaque point représente une valeur de vitesse moyennée sur une période de 20 minutes. La droite rouge montre la meilleure approximation linéaire de la dispersion des points et la ligne grise représente d’égalité. r est le coefficient de corrélation.

la Fig. 2.16) donne le ratio de la vitesse moyennée dans la colonne d’eau sur la vitesse de surface. Ce coefficient est de 0,83 et de 0,78 pour les sites au sud de la zone d’étude et dans le passage du Fromveur respectivement. Ces deux valeurs sont très proche du ratio de 0,8 déterminé par Prandle et Player (1993) dans le détroit du Pas-de-Calais et par Gooch et al. (2009) dans le Puget Sound, aux Etats-Unis.

Les résultats de cette étude comparative prouvent l’efficacité des systèmes radars pour la mesure de la vitesse de courant de surface de l’océan côtier. Ils démontrent également que l’utilisation des radars peut être gage de réussite pour la quantification de la variabilité spatiale et temporelle des courants dans la colonne d’eau.

2.2.3.5 Ressources hydrocinétiques

En s’appuyant sur les mesures radars et ADCP, les séries annuelles de densité de puissance cinétique P de l’écoulement dans la couche supérieure et inférieure de la colonne

d'eau (première et deuxième moitié) ont été générées. Pour le calcul, deux hypothèses ont été émises :

- les profils de vitesse obtenus dans le passage du Fromveur sont représentatifs de chaque point de grille où la profondeur est inférieure à 100 m, soit une zone de 550 km².
- les profils de vitesse obtenus plus au large sont représentatifs de chaque point de grille où la profondeur est supérieure à 100 m, soit une zone de 670 km².

Comme la puissance varie avec le cube de la vitesse, la densité de puissance moyenne annuelle P ne peut être estimée directement en substituant la vitesse moyenne dans l'équation 1 (Hagerman et al., 2006). Procéder ainsi a pour effet de sous-estimer la valeur de puissance moyenne calculée. L'évolution temporelle de la vitesse de courant en surface ainsi que les profils verticaux étant connus en chaque point de grille, les séries de puissance ont pu être générées dans tout le domaine d'étude. La vitesse étant l'unique variable dans le calcul de puissance, il n'est pas surprenant de retrouver la même distribution spatiale pour ces deux quantités. La Fig. 2.17 montre une grande variabilité spatiale de la ressource cinétique. Dans la couche supérieure, la puissance maximale varie de 0,5 kW/m² au sud de la zone d'étude à 25 kW/m² dans le passage du Fromveur et au nord-ouest de l'île d'Ouessant. Dans ces deux zones, la puissance moyenne annuelle est de 3,1 et 2,9 kW/m² respectivement (Fig. 2.17a). Dans la couche inférieure, la puissance est environ 3 fois plus faible que celle estimée dans la couche supérieure avec des valeurs maximales et moyennes comprises entre 0,5 à 10 kW/m² et de 0,1 à 1 kW/m² respectivement (Fig. 2.17b).

Toutefois, la densité de puissance cinétique varie avec les phases de marée. La Fig. 2.18 représente l'évolution de la puissance moyenne horaire et journalière, là où les vitesses les plus élevées ont été observées : le nord-ouest de l'île d'Ouessant (point A) et le centre du passage du Fromveur (point B). De très grandes variations à l'échelle journalière et mensuelle ont été mises en évidence sur ces deux points. Les histogrammes d'évolution de la puissance horaire indiquent une forte inégalité semi-diurne, laquelle génère des pics de puissance toutes les 6 heures aux deux emplacements. Enfin, l'évolution de la puissance jour-

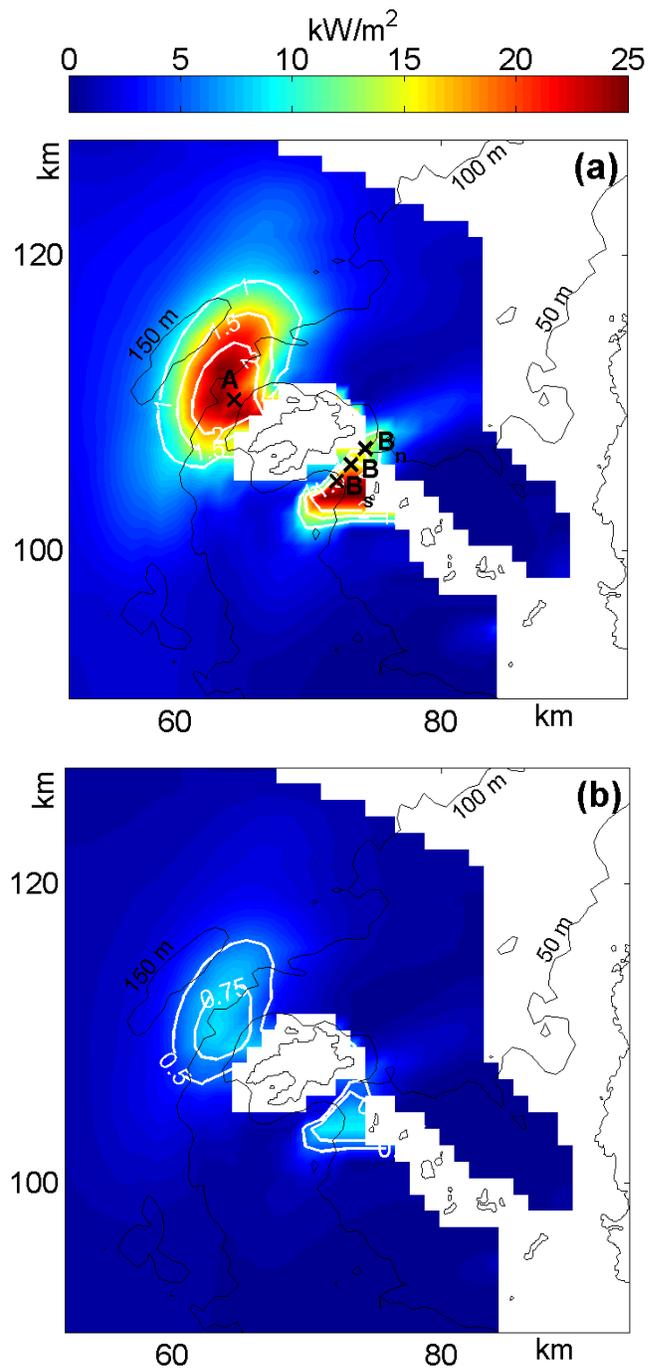


FIGURE 2.17 – Distribution spatiale de la densité de puissance cinétique moyenne (contours blancs) et maximale (code couleur) de l'écoulement disponible dans la couche supérieure (a) et inférieure (b) de la colonne d'eau. Les croix indiquent la position de points de grille ayant fait l'objet d'une étude détaillée.

nalière, sur une durée d'un mois permet de distinguer le cycle de marée vive-eau/morte-eau.

En complément, les distributions cumulées de la puissance cinétique aux points A et B ont été établies dans la couche supérieure et inférieure (Fig. 2.19). Dans la couche supérieure, les puissances de 1 ; 3 et 6 kW/m² sont atteintes respectivement 50%, 35% et 20% du temps sur les deux sites. Dans la couche inférieure, ces trois valeurs de puissance sont atteintes environ 30%, 5% et 2% du temps.

Une grande différence entre la puissance générée pendant les phases de vive-eau/morte-eau et dans une moindre mesure entre les phases de flot/jusant, en quatre points de grille (A, B, B_s et B_n), a été relevée et quantifiée (Tab. 2.2). Dans le Fromveur, la densité de puissance cinétique en vive-eau est de 3 (point B) à 5 (point B_n) fois plus élevée qu'en morte-eau. Le facteur 5 entre ces deux phases de marée est également atteint au nord-ouest de l'île d'Ouessant (point A). D'autre part, sur les sites A et B, le rapport $\langle P_{flot} \rangle / \langle P_{jusant} \rangle$ est d'environ 1,3 ; révélant des amplitudes de courant lors des phases de flot et de jusant quasiment équivalente. En revanche, au point B_s ce rapport est de 8, conséquence de la forte asymétrie des vitesses qui règne dans cette zone.

La densité de puissance cinétique étant proportionnelle au cube de la vitesse, l'asymétrie des vitesses peut générer des différences significatives dans la production de puissance au cours d'un cycle de marée. Pour démontrer cela, l'évolution de la densité de puissance cinétique au point B_n et B_s (voir la Fig. 2.17 pour les emplacements) est représentée sur la Fig. 2.20. Conséquence de l'asymétrie des vitesses de courant, la production de puissance

	$\langle P_{VE} \rangle$	$\langle P_{ME} \rangle$	$\langle P_{flot} \rangle$	$\langle P_{jusant} \rangle$	$\langle P_{surface} \rangle$	$\langle P_{fond} \rangle$
A	2,8	0,3	1,9	1,5	1,6	0,5
B	2,2	0,7	1,8	1,3	1,6	0,6
B _n	1,4	0,3	1,5	0,2	0,9	0,3
B _s	2,6	0,7	1,1	2,2	1,8	0,7

TAB. 2.2 – Estimation de la densité de puissance cinétique (kW/m²) en 4 points (A, B, B_n et B_s) autour de l'île d'Ouessant, moyennée au cours de différentes phases de marée, dans la couche supérieure de la colonne d'eau.

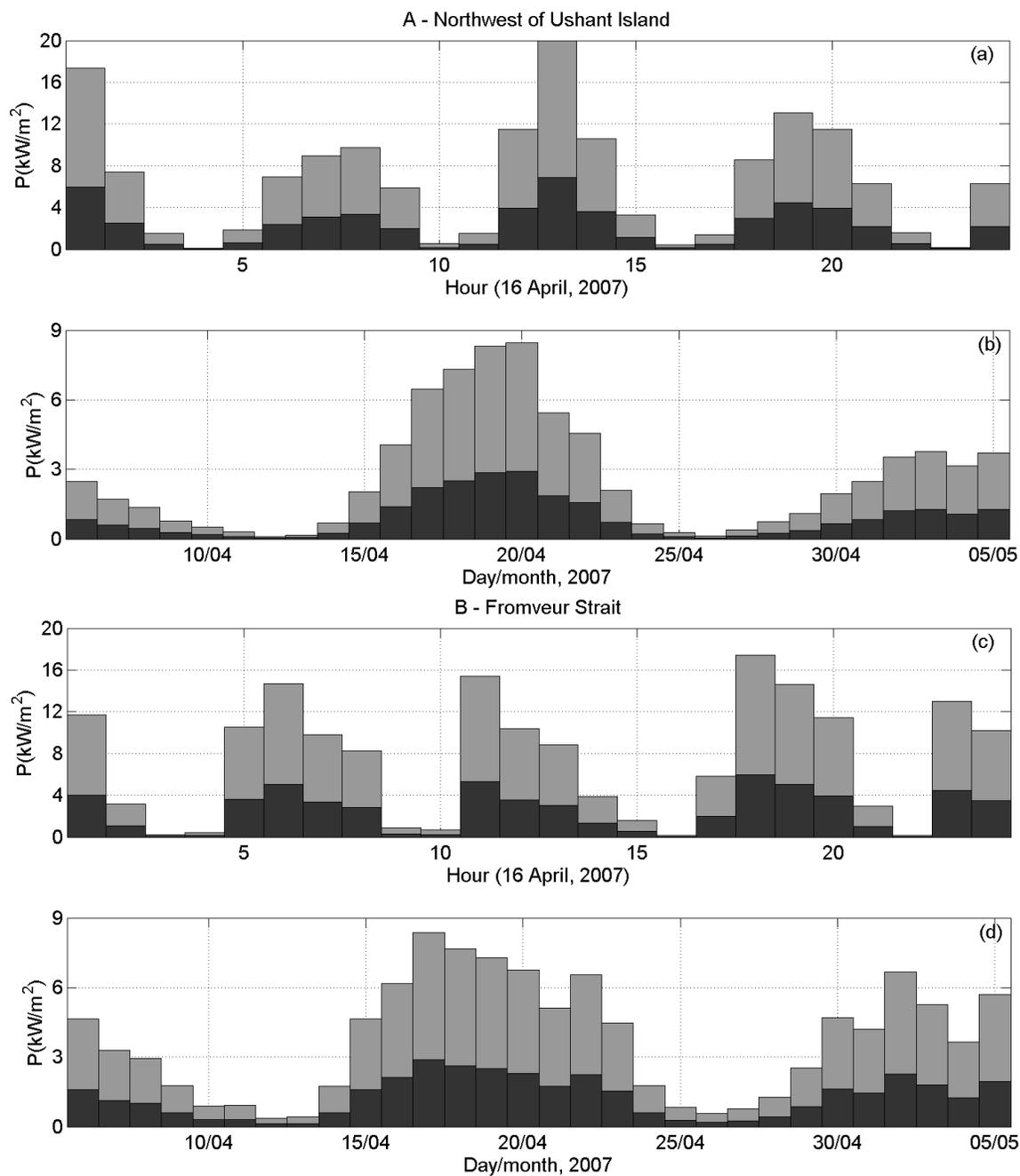


FIGURE 2.18 – Évolutions horaires et journalières de la densité de puissance cinétique au cours d’une journée (a-c) et d’un mois (b-d) aux points A (a-b) et B (c-d) dans la couche supérieure (gris) et inférieure (noir) de la colonne d’eau.

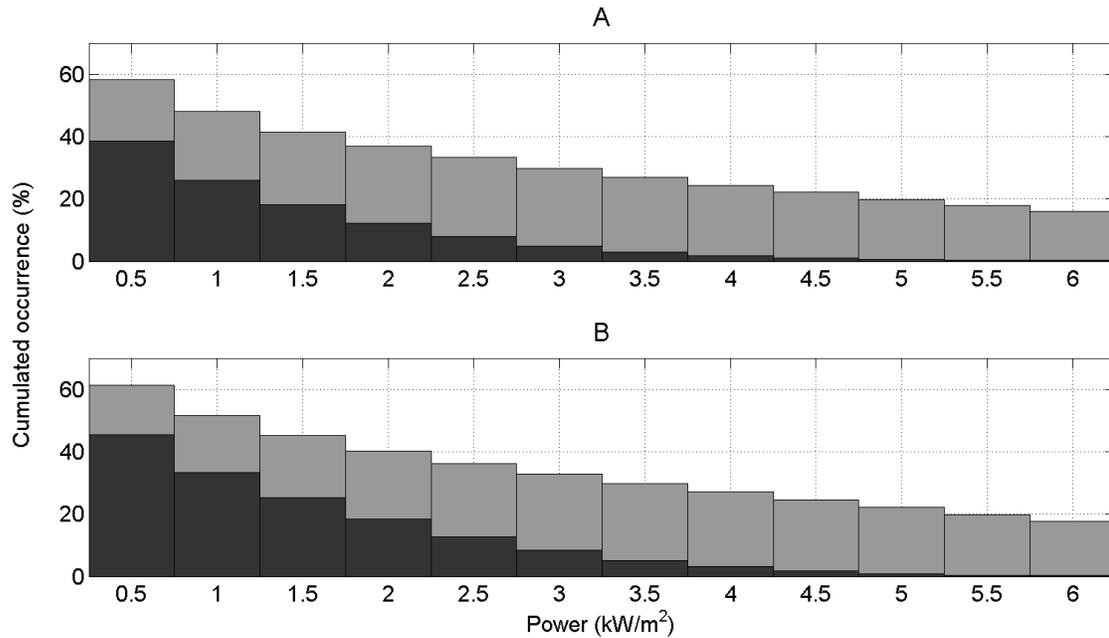


FIGURE 2.19 – Occurrences cumulées de la densité de puissance cinétique calculées au cours d’une année aux points A et B dans la couche supérieure (a) et inférieure (b) de la colonne d’eau.

sur ces deux emplacements est très inégale. Au point B_n , la puissance maximale est de l’ordre de 15 kW/m^2 pendant le flot et 2 kW/m^2 pendant le jusant contre 7 kW/m^2 et 20 kW/m^2 respectivement au point B_s . Cependant, la somme de la puissance P disponible en chaque point, équilibre la distribution journalière de puissance. Ainsi, l’installation de récupérateurs d’énergie fonctionnant exclusivement pendant le flot au point B_n et pendant le jusant au point B_s permettrait de tirer profit des forts courants générés pendant ces deux phases de marée, équilibrant ainsi la production journalière.

Cette problématique a également été abordée dans l’étude de Neill et al. (2014). Les auteurs ont démontré que même une asymétrie relativement modeste peut engendrer un fort déséquilibre dans la production de puissance. En particulier, ils ont révélé qu’une asymétrie des vitesses de 30% ($a = 1,3$) génère une asymétrie dans la production de puissance de 100%.

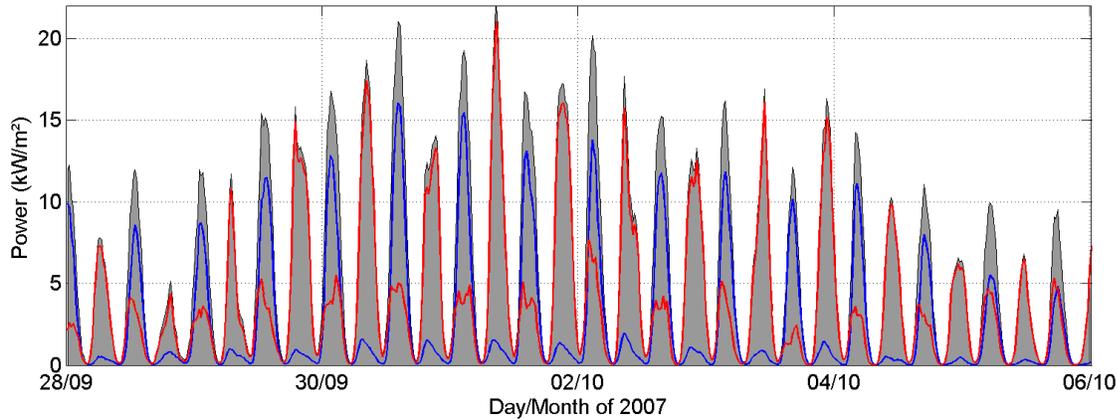


FIGURE 2.20 – Évolution temporelle de la densité de puissance cinétique disponible aux points B_n (bleu) et B_s (rouge). La somme des deux est représentée en gris.

La puissance P étudiée jusqu'à présent concerne la puissance disponible dans l'écoulement par unité de surface. Or, l'étude détaillée du potentiel hydrocinétique d'un site EMR nécessite l'estimation de deux autres grandeurs : la puissance théorique P_{th} ainsi que la puissance techniquement exploitable P_{exp} . La première grandeur suppose que l'hydrolienne convertit l'intégralité de l'énergie cinétique présente dans l'écoulement, en énergie mécanique puis en énergie électrique. Chaque étape de conversion ne donnant lieu à aucune perte énergétique. Il s'agit évidemment de considérations idéales, en réalité chaque étape de conversion dispose d'un rendement qu'il lui est propre. Le rendement global d'une machine étant la multiplication des rendements intermédiaires. Ces considérations de pertes énergétiques sont prises en compte dans le calcul de la puissance techniquement exploitable P_{exp} à travers une fonction de transfert $\tilde{F}(V)$ (Éq. 1.12) propre à chaque machine.

Les grandeurs P_{th} et P_{exp} ont été estimées en considérant un système à double hélice MCT Seagen (Fig. 0.5) de puissance nominale 1,2 MW, hypothétiquement installé dans la couche supérieure et inférieure de la colonne d'eau (Fig. 2.21), aux points A et B. Le choix de ces deux emplacements a été motivé par deux observations :

- la vitesse de courant en vive-eau y excède 2,5 m/s.
- la profondeur y est d'environ 50 m.

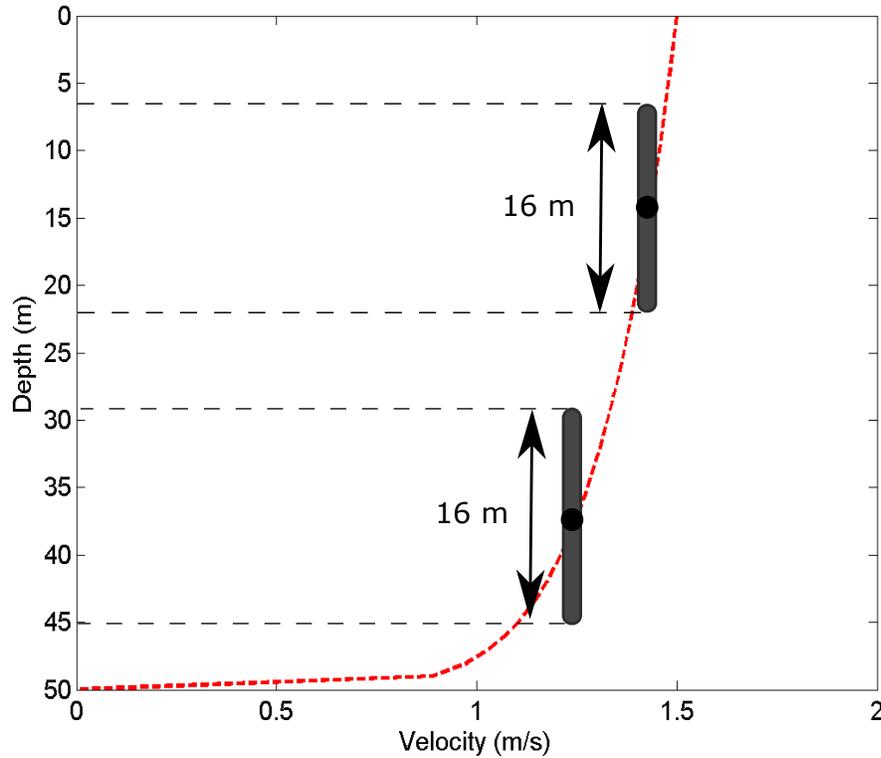


FIGURE 2.21 – Position du système MCT Seagen opérant dans la couche supérieure et inférieure de la colonne d’eau au nord-ouest de l’île d’Ouessant et au centre du passage du Fromveur. Le profil vertical de vitesse a été généré en considérant la loi de puissance déduite de l’étude statistique des données ADCP.

Ces deux conditions sont favorables à l’implantation de systèmes de récupération de « première génération ». La variabilité de P_{exp} et P_{th} au cours d’un cycle de marée complet est présentée sur la Fig. 2.22.

Les enregistrements des vitesses pour cette période (avril 2007) ont révélés de fortes amplitudes, engendrant ainsi une puissance techniquement exploitable atteignant fréquemment le seuil de 1,2 MW. Ceci explique pourquoi la gamme de variation mensuelle de P_{th} (0,05 - 3 MW) est nettement plus étendue que celle de P_{exp} (0 - 0,7 MW). D’autre part, une forte différence entre la puissance théorique disponible dans la couche supérieure et inférieure de la colonne d’eau a été identifiée. Au contraire, les variations de la puissance

	A		B	
	couche supérieure	couche inférieure	couche supérieure	couche inférieure
$\langle P_{th} \rangle$	0,9	0,55	1,2	0,7
$\langle P_{exp} \rangle$	0,3	0,2	0,4	0,25

TAB. 2.3 – Valeurs moyennes annuelles de la puissance théorique et techniquement exploitable estimées dans la couche supérieure et inférieure de la colonne d’eau en deux emplacements : le nord-ouest de l’île d’Ouessant (point A) et le centre du passage du Fromveur (point B).

techniquement exploitable dans ces deux couches sont assez similaires. Ce phénomène est dû au seuil de vitesse de 2,6 m/s, à partir duquel le système MCT Seagen génère sa puissance nominale. Au delà de cette valeur de vitesse, la production de puissance demeure constante. Dès lors, les vitesses maximales de 4 m/s observées dans la couche supérieure, aux points A et B, ne sont pas totalement exploitées par le système de récupération. En revanche, dans la couche inférieure, les vitesses maximales observées sont équivalentes à la vitesse de seuil, d’où une puissance techniquement exploitable quasiment similaire dans la couche supérieure et inférieure de la colonne d’eau.

La variabilité temporelle de P_{th} et de P_{exp} est gouvernée par le cycle de marée vive-eau/morte-eau. La Fig. 2.22 montre que cette évolution semi-mensuelle est moins prononcée dans le passage du Fromveur (site B) où la gamme de variation est plus faible que celle observée sur le site A. Bien que la puissance maximale soit plus importante en A qu’en B, la puissance théorique et techniquement exploitable sur une moyenne annuelle est 25% supérieure en B qu’en A (Tab. 2.3).

Cette étude peut s’étendre à l’estimation de la puissance pouvant être générée par un ensemble de récupérateurs d’énergie connectés en réseau. Le développement de parcs hydroliens est d’ailleurs l’objectif avéré de régions à fort potentiel énergétique. Le projet d’une ferme hydrolienne de 150 récupérateurs, installée au large de l’île d’Aurigny (Alderney en anglais) à l’horizon 2020 en est le meilleur exemple.

Dans la perspective du développement de parcs hydroliens, [Blunden et al. \(2013\)](#) ont

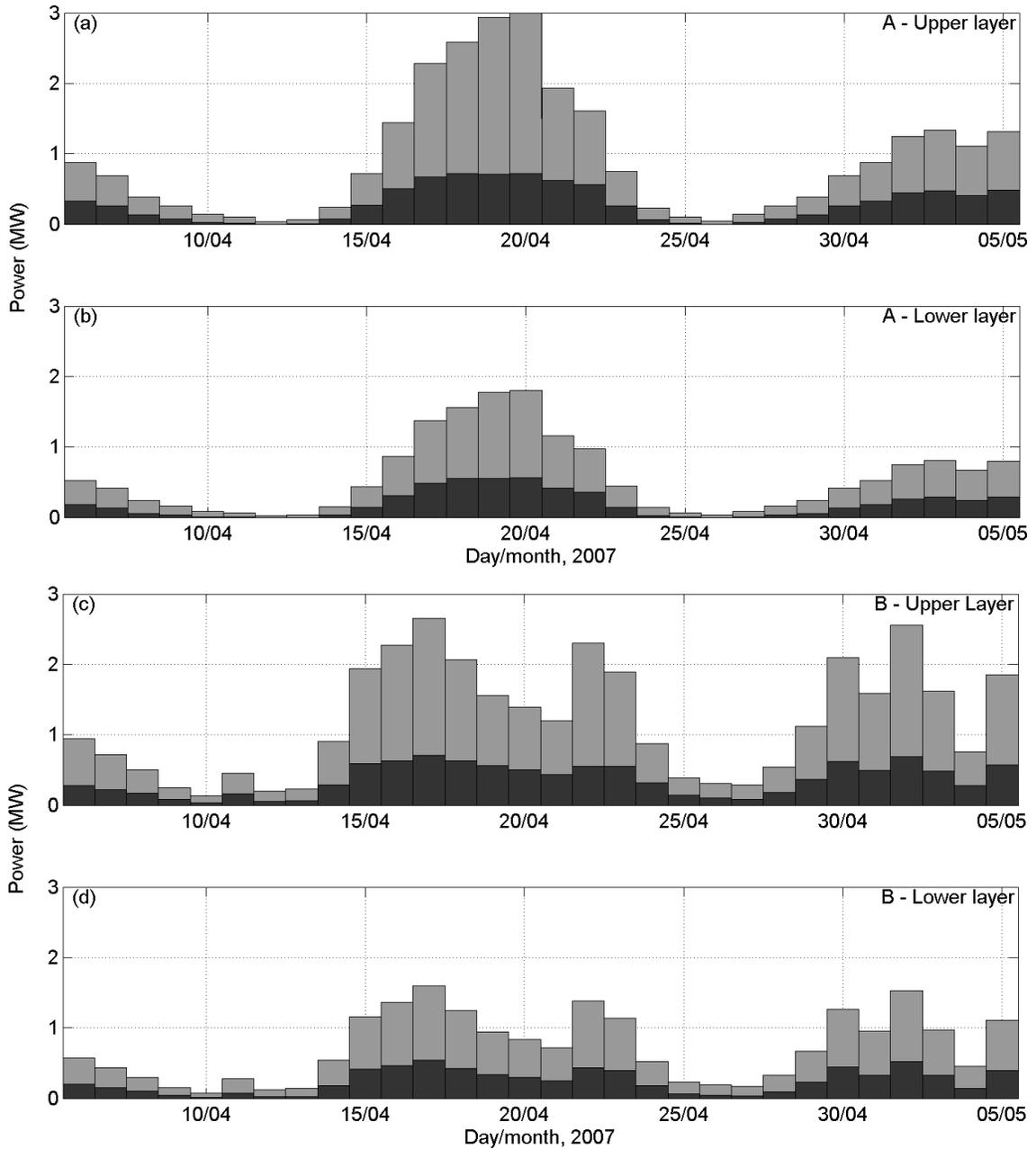


FIGURE 2.22 – Évolution de la puissance théorique P_{th} (gris) et techniquement exploitable P_{exp} (noir) généré par un système MCT Seagen sur la base d'une moyenne journalière, pendant une période d'un mois au nord-ouest de l'île d'Ouessant (A) (a-b) et dans le passage du Fromveur (B) (c-d), dans la couche supérieure et inférieure de la colonne d'eau.

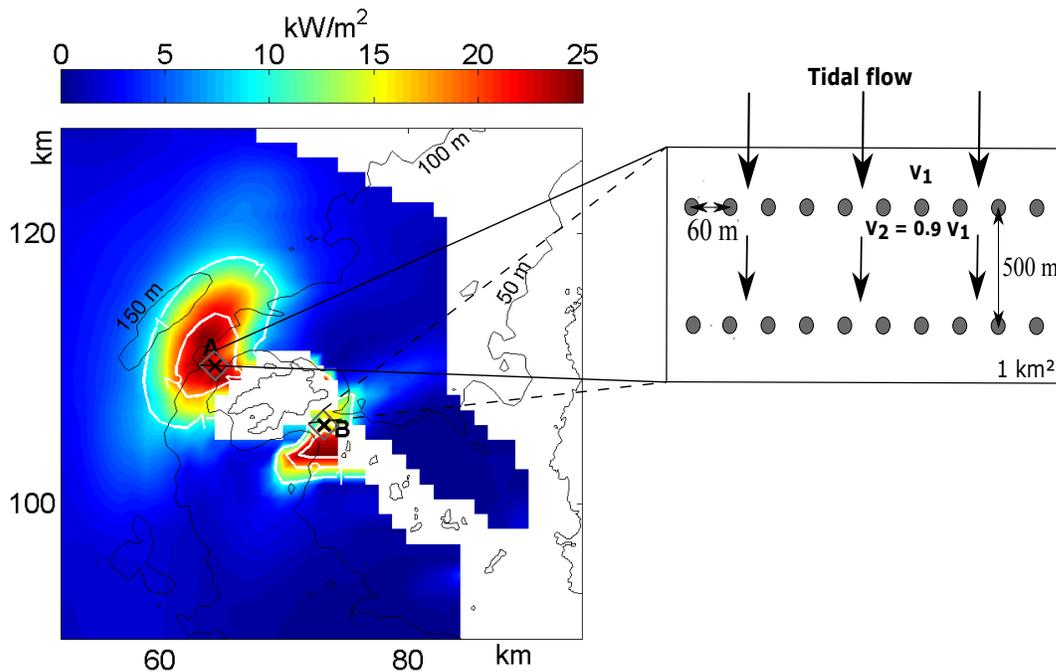


FIGURE 2.23 – Configuration du réseau de 20 hydroliennes MCT Seagen installé au nord-ouest de l’île d’Ouessant et au centre du passage du Fromveur sur une superficie de 1 km^2 . L’écart latéral entre chaque dispositif a été fixé à 60 m et celui entre les deux rangées, à 500 m.

proposé une méthodologie visant à estimer la puissance pouvant être générée par de telles installations. Les auteurs ont appliqué leur méthodologie, en considérant des systèmes Sea-Flow (16 m de diamètre) installés sur une zone d’environ 25 km^2 dans le passage d’Alas en Indonésie. Les hydroliennes étaient disposées en rangées successives espacées de 500 m. L’espace latéral entre chaque récupérateur d’énergie était fixé à une distance moyenne de 60 m. En utilisant cette configuration, la puissance P_{exp} pouvant être générée par un réseau d’hydroliennes MCT Seagen à double hélices et opérant dans la couche supérieure et inférieure de la colonne d’eau a été estimée. Deux zones de 1 km^2 , l’une centrée en A, l’autre en B, ont été considérées pour l’estimation. Compte tenu de l’écart entre les rangées et les récupérateurs, seul un maximum de 20 hydroliennes, disposées en deux rangées, peuvent être installées dans une zone de 1 km^2 . C’est ce nombre qui a été utilisé pour l’estimation. Enfin, pour tenir compte de la réduction de vitesse engendrée par la première rangée d’hy-

droliennes, la vitesse de l'écoulement faisant face à la deuxième rangée a été réduite de 10% (Blunden et al., 2013).

Les résultats de l'étude ont révélé que la puissance annuelle pouvant être générée par un réseau de 20 hydroliennes MCT Seagen opérant dans la couche supérieure de la colonne d'eau, au point A et B, est de l'ordre de 50 GWh et 60 GWh respectivement. Dans la couche inférieure, un tel réseau est capable de fournir une puissance de 33 et 38 GWh.

2.3 Estimation du potentiel dans le Déroit du Pas-de-Calais

2.3.1 Site d'étude, conditions et contraintes environnementales

Le site d'étude se situe en Manche, le long de la côte d'Opale (Fig. 2.24, panneau de droite). Dans cette région, le trait de côte est orienté de manière méridionale (sud - nord) avec une large échancrure dans la partie centrale (port de Boulogne/mer) et un certain nombre de petites criques et d'estuaires. La profondeur du déroit est relativement faible (50 m) et abrite un réseau de dunes sous-marines (ou « dunes hydrauliques ») qui se déplacent (de 40 à 70 m par an) et se modifient sous l'effet des courants et de la marée.

Les observations par radars VHF en Manche ont débuté il y a plus de trois décennies. Broche et al. (1986) ont été les premiers à publier les résultats de 3 jours de mesures radars, menées en 1982 en Baie de Seine. Au début des années 1990, une campagne de mesures des courants par radar a été effectuée dans le Pas-de-Calais (Prandle et al., 1993). Deux radars VHF OSCR (Ocean Surface Current Radar) ont été installés successivement sur la côte anglaise, puis française afin d'obtenir une couverture presque totale du déroit du Pas-de-Calais. Cette expérience, d'une durée totale de 11 mois, fut la première à permettre une cartographie des courants marins sur une longue période à l'échelle du déroit où toute autre technique de mesure aurait échoué compte tenu de l'hydrodynamisme fort, des conditions météorologiques difficiles et du trafic maritime soutenu. Ces données expérimentales exceptionnelles, de part leur résolution spatiale et temporelle, ont permis notamment de

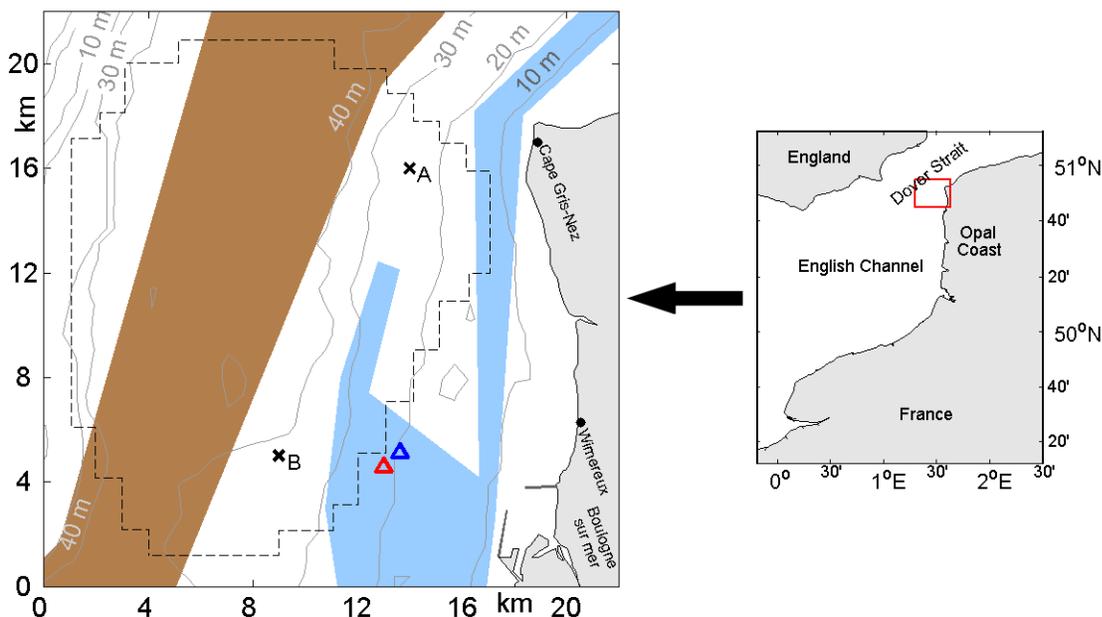


FIGURE 2.24 – Domaine d'étude : le détroit du Pas-de-Calais en Manche (rectangle rouge sur le panneau de droite). Les sites radars sont indiqués par les points noirs. Les triangles bleu et rouge montrent l'emplacement des ADCPs installés en juin 2008 et juillet 2009 respectivement. Les croix noires montrent les sites A et B, sélectionnés pour une analyse détaillée. La voie de navigation des navires commerciaux est représentée en marron, celle en bleu représente la zone de pêche. La bathymétrie est représentée par les contours gris clair avec le pas de 10 m. Le contour en trait noir hachuré indique la zone de couverture radars. Les noms géographiques mentionnés dans le texte, apparaissent également.

quantifier la contribution de différentes ondes de marée dans la variabilité des courants et d'étudier la circulation résiduelle en fonction des influences de la marée et du vent (Prandle, 1993, Sentchev et Yaremchuk, 1999).

Au cours des années 2000 - 2010, d'autres études ont été menées à l'aide de systèmes radars VHF (Sentchev et Yaremchuk, 2007) ou de modèles numériques (e.g. Sentchev et Korotenko, 2005, Du Bois et al., 2012, Jouanneau et al., 2013). Les auteurs ont démontré que l'hydrodynamisme local est presque essentiellement dominé par la marée. Les variations de hauteur d'eau enregistrées à Boulogne-sur-mer fluctuent dans une large gamme (de 4 à 9 m) au cours d'un cycle semi-mensuel, tandis que les courants de marée sont typiquement de l'ordre de 1-1,5 m/s (Sentchev et al., 2006, Ouahsine et al., 2006). Les courants ont une

période semi-diurne avec une modulation semi-mensuelle significative due à l'interférence des ondes M_2 , S_2 et N_2 . Cette interférence génère des harmoniques d'ordre supérieur (M_4 et MS_4) et crée une asymétrie de la courbe d'élévation du niveau de la mer et des vitesses de flot d'amplitudes supérieures à celle de jusant (Korotenko et Sentchev, 2011).

Bien que les processus physiques qui règnent dans le détroit du Pas-de-Calais soient bien établis, aucune étude précise portant sur l'estimation du potentiel hydrocinétique de la zone n'a encore été effectuée. La seule évaluation menée jusqu'à présent est celle réalisée dans le cadre du programme Aquatic Renewable Energy Technologies (Aqua-RET) fondé par l'Agence Nationale Irlandaise (ANI) (www.aquaret.com). À partir d'un modèle numérique 2D, l'ANI a référencé et cartographié les sites favorables à l'exploitation de l'énergie tidale dans toutes les mers d'Europe (Fig. 0.6). Néanmoins cette étude est très approximative, le potentiel hydrocinétique de chaque site étant résumé à un seul mot : faible, moyen ou fort.

Cette étude a évalué le potentiel d'origine tidale dans le détroit Pas-de-Calais comme étant « moyen ». Cette conclusion est évidemment insuffisante pour mener à bien un éventuel projet de récupération de l'énergie tidale. L'un des objectifs avérés du projet européen Pro-Tide et de ce travail de thèse est de fournir une évaluation détaillée du potentiel hydrocinétique disponible dans le détroit du Pas-de-Calais.

Par son statut de bras de mer entre l'océan Atlantique et l'Europe du Nord, la Manche constitue la principale voie maritime entre l'océan Atlantique et l'Europe du Nord. Environ 20% du trafic mondial passe par la Manche. Les courants et la densité du trafic, ainsi que le nombre élevé de navires transportant des produits dangereux font de la partie nord de la Manche une zone où les dangers et risques pour la sécurité maritime et la sécurité civile sont nombreux et importants. La voie maritime réservée aux navires en direction de la mer du Nord est représentée en marron sur la Fig. 2.24. À cela s'ajoute les activités de pêches, intenses dans cette région (zone bleu sur la Fig. 2.24). Le port de Boulogne étant considéré comme le premier port de pêche français avec une flottille diversifiée de près de 150 bateaux.

Les résultats de l'étude du potentiel d'énergie tidale présentés dans cette section tiennent compte de toutes ces contraintes environnementales imposées par l'activité économique.

2.3.2 Systèmes d'observations des courants de marée

Deux radars VHF COSMER ont été déployés pendant une période de 35 jours, en mai-juin 2003, sur les sites du Cap Gris-Nez et de Wimereux (devant le laboratoire), 12 km plus au sud (Fig. 2.24). Cet équipement a été prêté par le LSEET (Laboratoire de Sondages Electromagnétiques de l'Environnement Terrestre de l'université de Toulon et du Var) dans le cadre du projet « Manche – sud Mer du Nord » du Programme National d'Environnement Côtier. Chaque site comprenait un réseau d'émission de quatre antennes, orientées le long de la médiane du cône de couverture radar et d'un réseau de réception (Fig. 2.25). Ce dernier, composé de 8 antennes équidistantes, s'étalait sur 25 m de long, perpendiculairement au réseau d'émission. Les deux radars opérant à 45 MHz (Cap Gris-Nez) et 47,8 MHz (Wimereux) étaient configurés pour atteindre une portée de 25 km avec une résolution distance-azimuth de 600 m et 10° respectivement.

Les vitesses enregistrées par radars ont été interpolées aux points de grille régulière et combinées de manière à produire des cartes vectorielles de courant dans la zone de recouvrement des radars.

Deux ADCPs Workhorse Sentinel RDI de 1,2 MHz ont été déployés sur le fond marin. Les instruments ont été installés à 6 km du port du Boulogne/mer à 18 m de profondeur (Fig. 2.24). Le premier ADCP a été déployé du 1^{er} au 4 juillet 2008, le second, du 9 au 16 juin 2009, pendant la période de transition de vive-eau vers morte-eau. Les vitesses ont été enregistrées à une fréquence de 1 Hz avec une résolution verticale de 0,5 m, de 1 m au dessus du fond jusqu'à la surface. Les données dans les 3 derniers mètres de la couche supérieure (au voisinage de la surface) n'ont pas été considérées à cause de la contamination du signal par les vagues.

Nous avons également utilisé les sorties du modèle de circulation MARS 3D couvrant la totalité de la manche orientale (Jouanneau et al., 2013). La résolution horizontale du modèle était fixée à 140 m. La verticale contenait 20 niveaux σ de manière à fournir une meilleure résolution près de la surface et du fond marin. La résolution temporelle a été fixée à 30 secondes sur les frontières ouvertes, le long de la Côte d'Opale. Le forçage de marée a été établi par un modèle de circulation de résolution plus dégradé (~ 1 km). Celui-ci considère la totalité du spectre d'ondes de marée au niveau des deux frontières ouvertes de la Manche orientale. De plus, un forçage réaliste du vent et des apports fluviaux ont été utilisés. Le modèle tient compte du phénomène de recouvrement des plages (Dumas et al., 2009). La validation du modèle régional a été faite en comparant les hauteurs d'eau simulées dans 20 ports (français et anglais) avec les données fournies par le SHOM. Plus de détails



FIGURE 2.25 – Réseau de réception de 8 antennes, installé au cap Griz-Nez en avril-mai 2003.

sur la configuration du modèle et de la validation peuvent être trouvés dans [Jouanneau et al. \(2013\)](#). Les vitesses de courant simulées par le modèle pendant une période de 30 jours, en juin 2009, ont été utilisées pour la comparaison avec les vitesses obtenues par un ADCP déployé au cours de la même période.

2.3.3 Résultats

2.3.3.1 Amplitudes de courant et occurrences de vitesse

Les ellipses de courant, obtenues par la méthode PCA appliquée aux données radars du 16 mai 2003 sont représentées sur la Fig. 2.26, à titre d'exemple. Ce jour-là, les radars ont enregistré les courants les plus forts. L'orientation des ellipses indique que le courant est régit par la topographie. Un alignement de l'axe majeur des ellipses le long des contours de bathymétrie est clairement identifiable. Une anisotropie du champ de vitesse avec une excentricité relativement élevée est observée au niveau du banc de sable, au centre du domaine d'étude.

Les ellipses noires et blanches sur la Fig. 2.26, indiquent que le vecteur courant est orienté dans le sens direct et indirect respectivement. Deux zones à sens de rotation opposé sont identifiées. Elles sont séparées par une ligne suivant grossièrement le contour d'isobath 30 m. Cela suggère qu'au cours d'un cycle de marée, le courant de surface est alternativement convergent et divergent.

La vitesse moyenne de courant sur le mois varie spatialement de 0,5 m/s au sud à 1 m/s au nord, à environ 6 km du Cap Gris-Nez (noté CGN par la suite). Ici, en vive-eau, la vitesse moyenne atteint 1,4 m/s. Dans tout le domaine, la vitesse maximale du courant de surface excède 2 m/s.

La Fig. 2.27 montre les distributions spatiales des occurrences de vitesse de 1 m/s et 1,5 m/s, estimées pour toute la période d'observation. La vitesse de 1 m/s est atteinte dans la majorité du domaine avec un minimum d'occurrence de 20%. Dans la partie centrale et

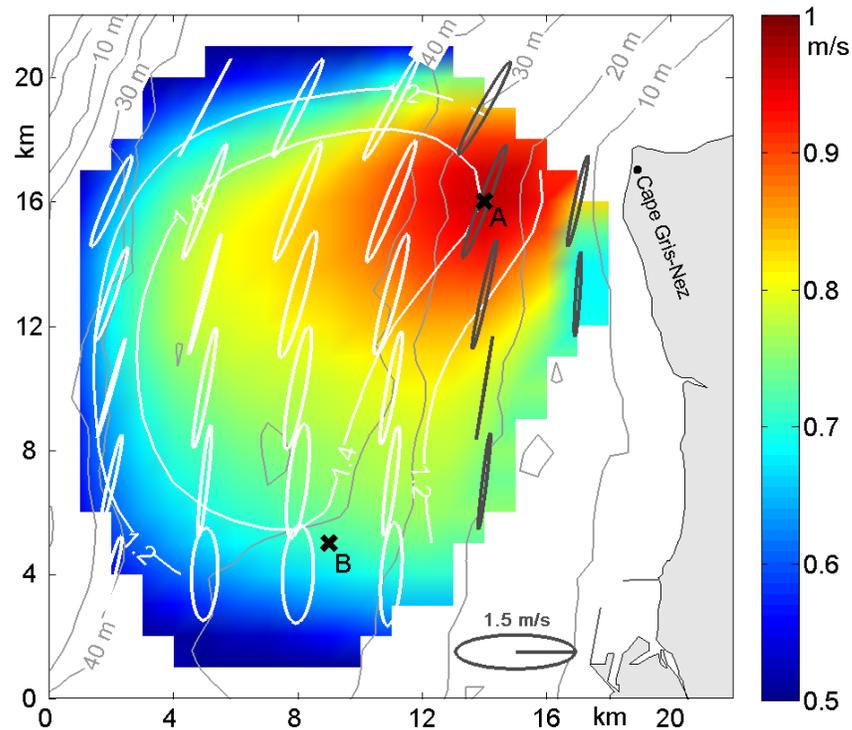


FIGURE 2.26 – Vitesse moyenne des courants de surface (code couleur) mesurés par radars en avril-mai 2003 et vitesse moyenne des courants de vive-eau (contours blancs). Les ellipses de courant obtenues le 16 mai en période de vive-eau sont également représentées (une ellipse sur trois est montrée). Les ellipses noires et blanches indiquent que le vecteur courant est orienté dans le sens direct et indirect respectivement. Les croix noires montrent les emplacements des sites sélectionnés pour une analyse détaillée.

dans le secteur nord-est, cette vitesse est excédée 30% et 50% du temps. La distribution spatiale des occurrences de vitesse de 1,5 m/s (Fig. 2.27b) évolue dans une gamme de variation plus réduite : de 5% à 15% dans la majorité du domaine. Le pic d'occurrence est atteint au nord-est de la zone d'étude.

Les distributions cumulatives des occurrences de vitesse, établies au point A, à l'ouest du CGN et au point B, à l'ouest du port de Boulogne sont représentées sur la Fig. 2.28. Cette différence est due à l'intensification de l'écoulement au voisinage du cap, conséquence du resserrement du détroit (Fig. 2.24). Le choix d'effectuer une étude détaillée sur ces deux points est justifié par leur position géographique (entre la voie maritime et la zone de pêche)

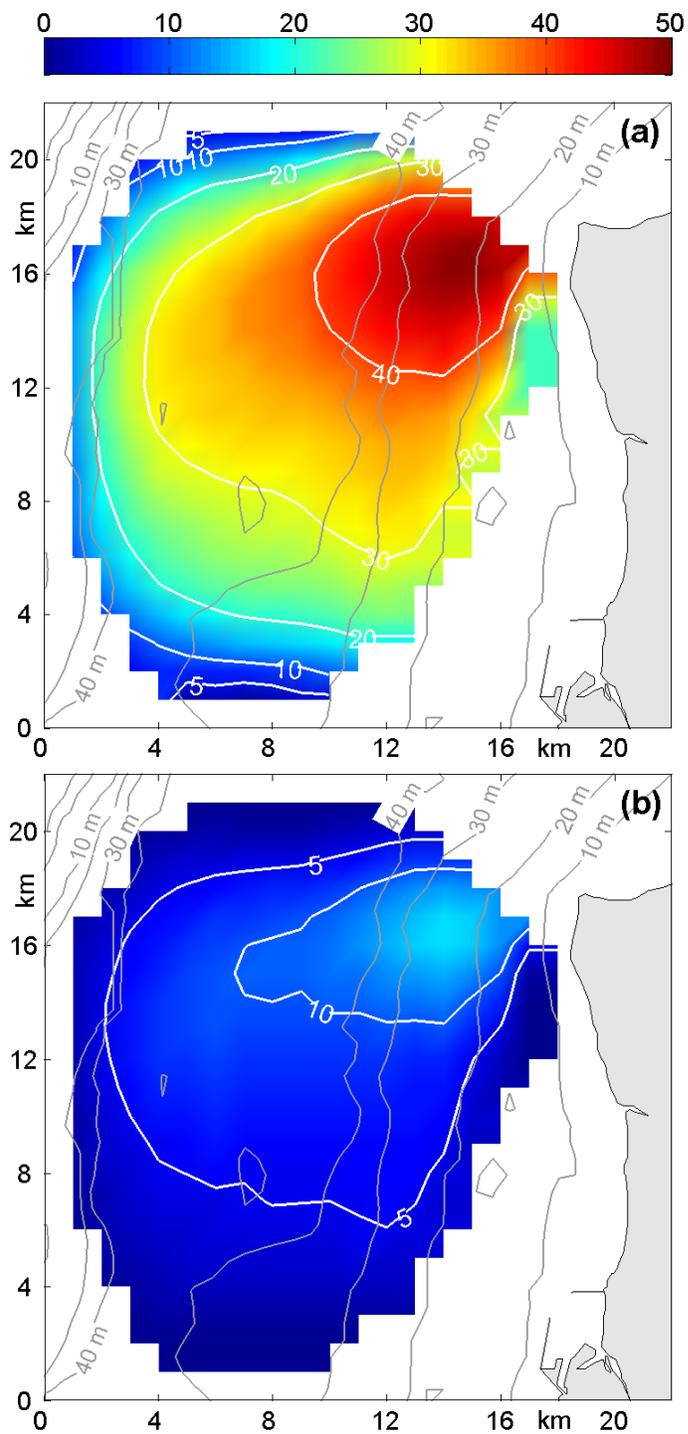


FIGURE 2.27 – Occurrences de vitesse pour les valeurs : 1 m/s (a) et 1,5 m/s (b).

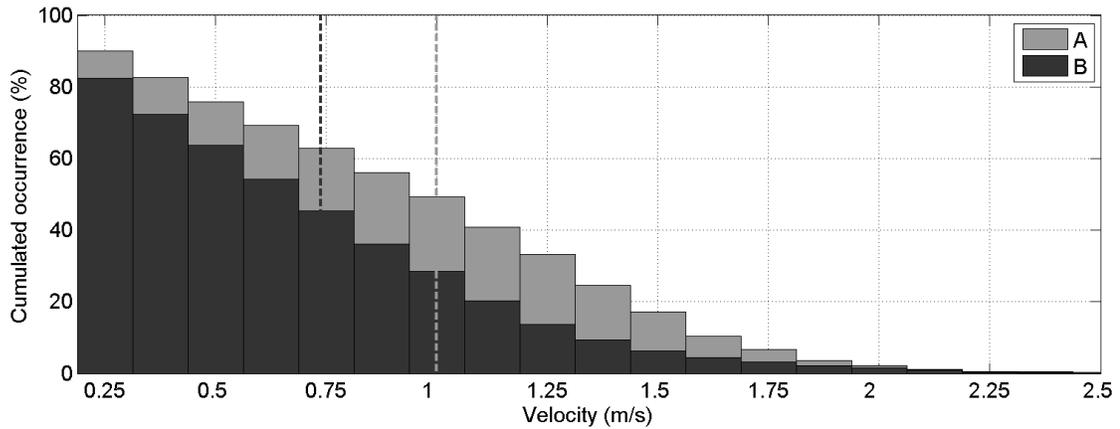


FIGURE 2.28 – Distribution cumulative des occurrences de vitesse sur les sites A et B. Les lignes en pointillé représentent les vitesses moyennes calculées sur chaque emplacement.

ainsi que par la profondeur du site (entre 25 et 35 m), idéale pour l’implantation de récupérateur d’énergie tidale (Couch et Bryden, 2006).

La vitesse de 1 m/s est excédée 50% du temps au point A et 25% du temps au point B. La vitesse de 1,5 m/s est atteinte 3 fois plus souvent en A qu’en B (18% et 6% respectivement). La vitesse moyenne en A est de 1 m/s contre 0,75 m/s en B.

2.3.3.2 Asymétrie des vitesses de courant

La distribution spatiale de l’asymétrie des vitesses de courant a est représentée sur la Fig. 2.29. L’asymétrie est supérieure à 1 dans la quasi-totalité du domaine. La seule exception concerne la partie est de la zone où l’asymétrie est légèrement inférieure à 1. L’asymétrie maximale ($a = 1,6$) est atteinte à 6 km à l’ouest du CGN, elle est la conséquence de l’effet du cap sur la distribution spatiale de la phase et de l’amplitude de l’onde principale de marée M_2 et de son harmonique supérieure M_4 dont la présence dans le spectre des vitesses de courant a été mise en évidence par l’étude numérique de Jouanneau et al. (2013).

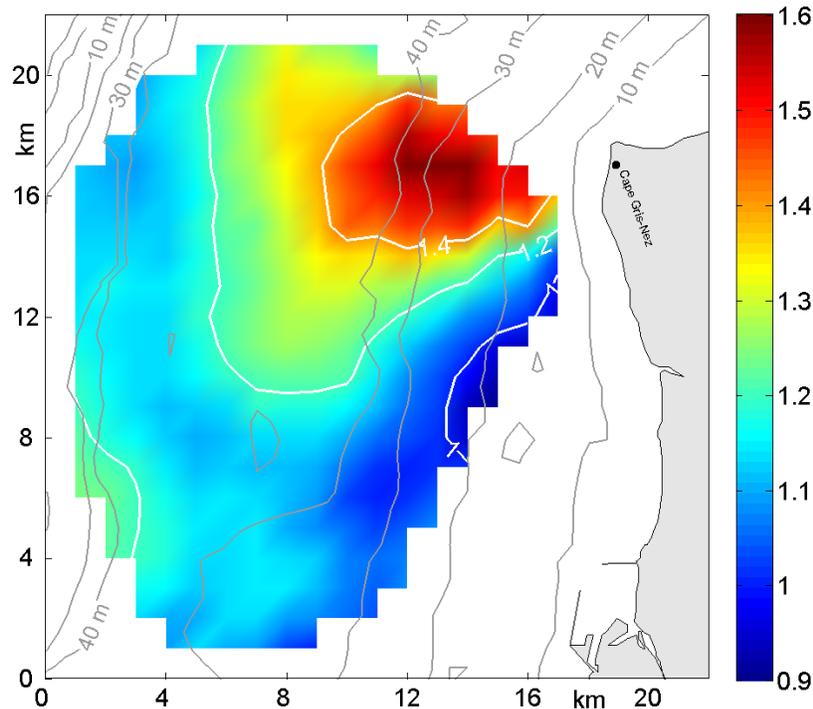


FIGURE 2.29 – Distribution spatiale de l'asymétrie a des vitesses de courant.

2.3.3.3 Asymétrie de direction du courant dominant

La distribution spatiale de l'asymétrie de direction $\Delta\theta$ entre la phase de flot et de jusant est représentée sur la Fig. 2.30. Les valeurs d'asymétrie varient de 2° à 10° . Le minimum d'asymétrie est observé en périphérie sud de la zone d'étude. Une augmentation graduelle de $\Delta\theta$ est observée du sud vers le nord où la valeur maximale atteint 10° . Ici, pendant le jusant, l'onde de marée en provenance de la mer du Nord se propage dans la direction sud-ouest. En revanche, pendant le flot, l'onde est orientée nord, créant ainsi un désalignement entre la direction du courant de flot et de jusant.

2.3.3.4 Profils de vitesse

Les données récoltées par deux ADCPs déployés au large de Boulogne ont été analysées. L'étude s'est portée sur trois périodes : celle contenant le pic de vitesse et sur deux

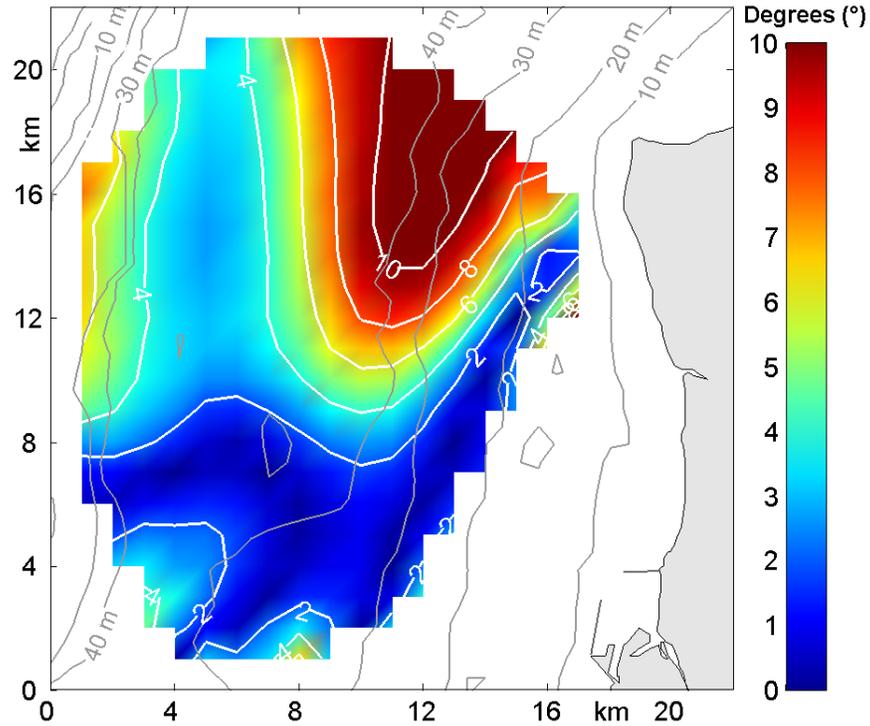


FIGURE 2.30 – Distribution spatiale de l’asymétrie $\Delta\theta$ entre la direction du courant dominant de flot et de jusant.

périodes de part et d’autre de la période de vitesse maximale. À partir des données ADCPs, les profils moyens ont été générés pour les phases de flot et jusant et approximés par la loi de puissance $\tilde{V}(z) = V_0(z/d)^{1/\alpha}$ (Fig. 2.31). L’analyse révèle que l’évolution du profil vertical de vitesse suit une loi en $1/6^{\text{ème}}$ pendant le flot et une loi en $1/7^{\text{ème}}$ pendant le jusant. Les valeurs minimales de α sont atteintes 1 heure avant le pic de vitesse. Elles augmentent ensuite graduellement jusqu’à atteindre leur valeur maximale, 1 heure après le pic de vitesse (Tab. 2.4). D’autre part, les valeurs de α varient dans une gamme plus étendue en jusant (de 6 à 7,5) qu’en flot (de 5,5 à 6,5). L’écart-type $\Delta\alpha$, estimé pour chaque période d’une heure autour du pic de vitesse, est proche de 1 en moyenne.

En suivant la même méthodologie, les profils de vitesse issus des simulations numériques du modèle MARS-3D ont été analysés et comparés à ceux obtenus à partir des mesures ADCP de juin 2009. Le modèle simule la distribution de vitesse dans toute la

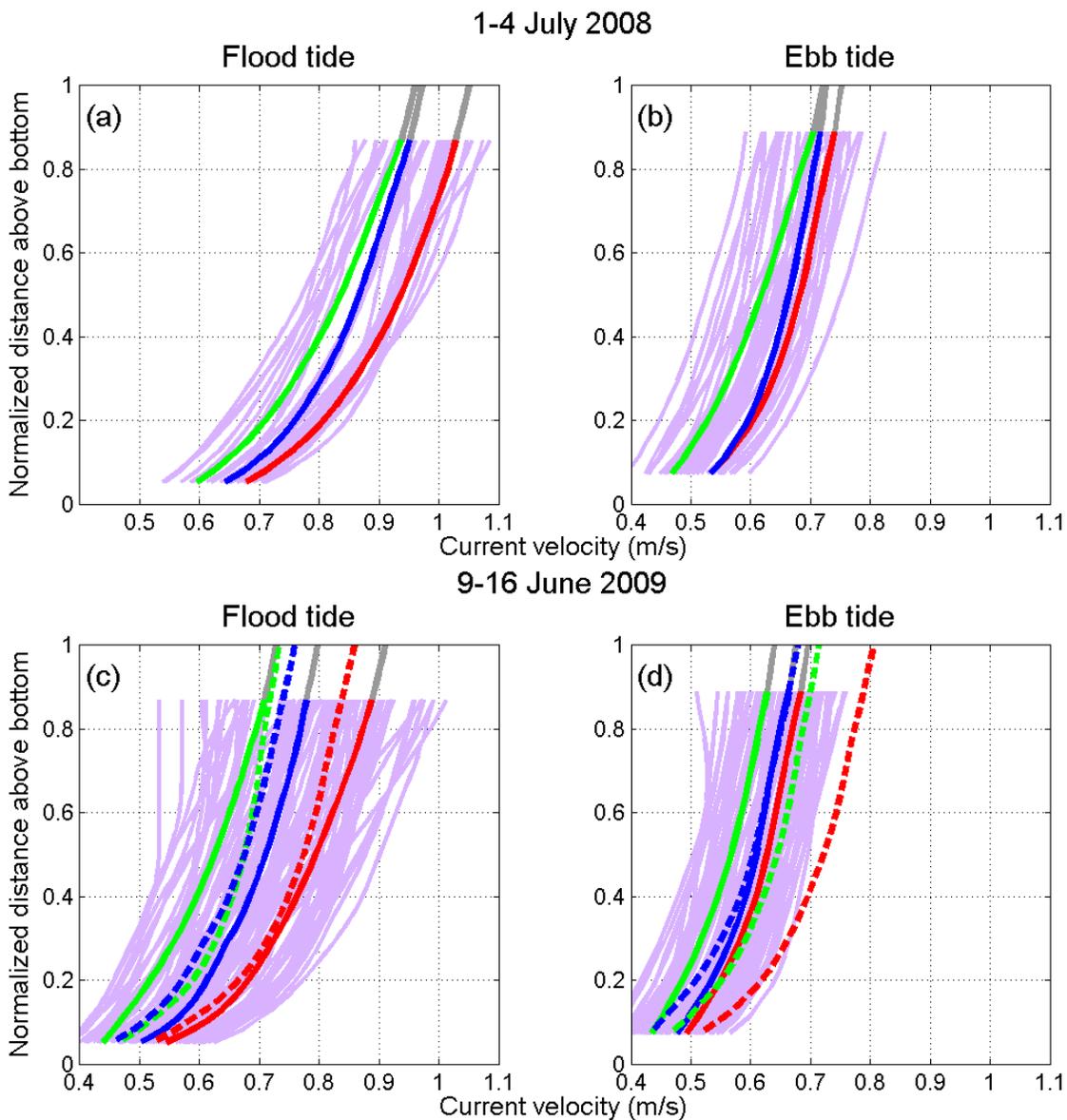


FIGURE 2.31 – Profils verticaux de vitesse de courant obtenus en flot (a-c) et jusant (b-d), à partir des mesures ADCP effectuées en 2008 (a-b) et 2009 (c-d) au large de Boulogne/mer. Les profils moyens au cours de la période du pic de vitesse sont représentés en rouge ceux obtenus une heure avant et après le pic de vitesse sont représentés en vert et bleu respectivement. Les profils initiaux (moyennés sur 20 minutes) sont tracés en violet. Les profils en trait plein proviennent de l'analyse des vitesses observées, ceux en pointillé résultent du modèle numérique. L'extrapolation de l'évolution de la vitesse dans la couche de surface est représentée en gris.

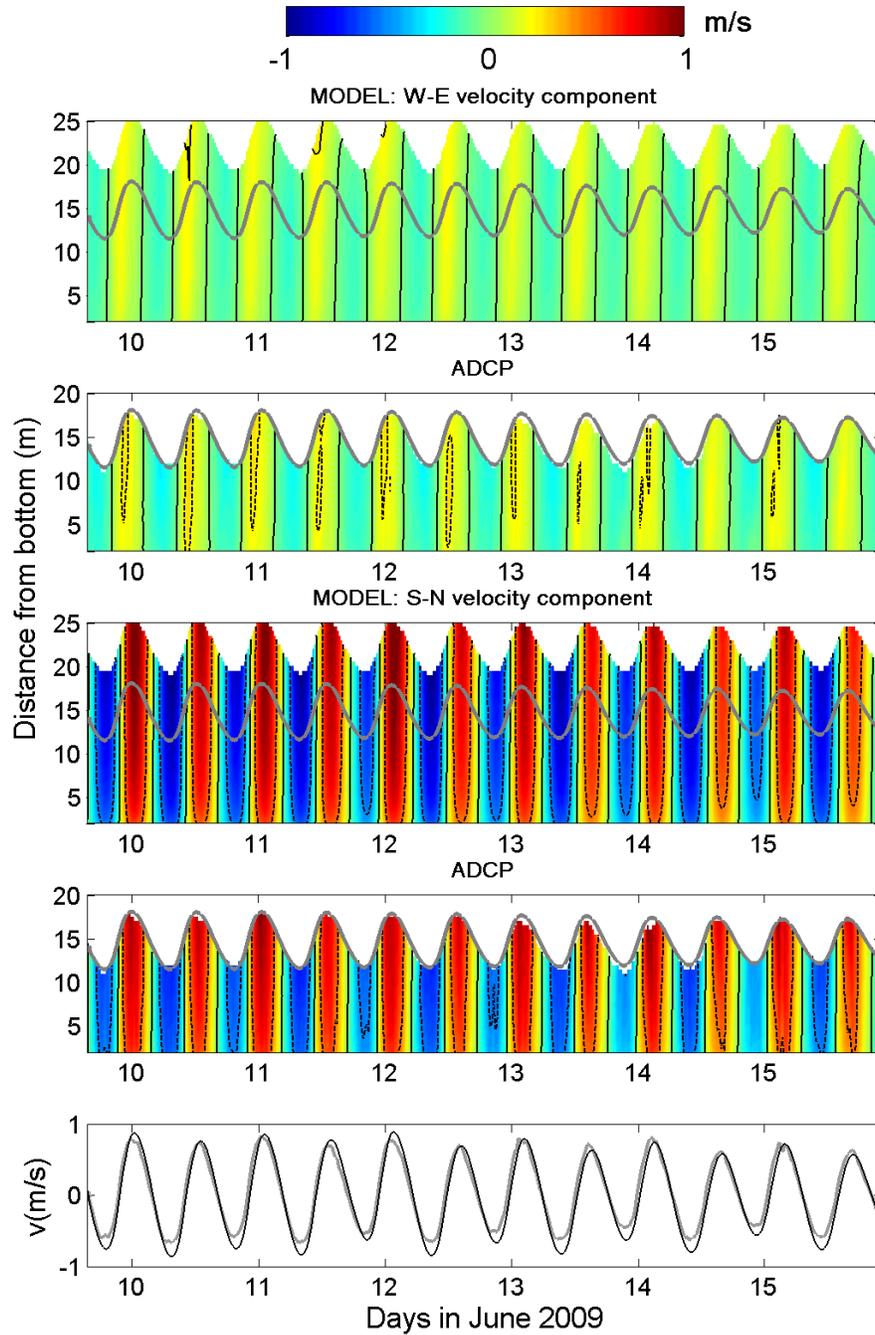


FIGURE 2.32 – Variabilité temporelle sur toute la colonne d’eau de la composante zonale u et méridionale v de vitesse dérivant des observations ADCP et du modèle numérique, au cours d’un semaine, en juin 2009. La courbe grise représente la limite supérieure des mesures ADCP. La dernière fenêtre montre l’évolution temporelle de la vitesse v , moyennée sur la verticale, obtenue par ADCP (gris) et par le modèle (noir).

colonne d'eau, y compris dans la couche de surface, là où l'ADCP peine à fournir des mesures de vitesse fiables. Seule une extrapolation permet d'approximer l'évolution du profil de vitesse dans cette couche. Les profils moyens des vitesses modélisées sont représentés en pointillé sur la Fig. 2.31. L'évolution des profils extrapolés sont en accord avec les vitesses simulées par le modèle. Le coefficient α obtenu à partir des profils mesurés et modélisés est très proche, l'erreur relative d'approximation des profils mesurés par la loi de puissance n'excédant pas 7 %. La forme des profils générés par le modèle pour différentes phases du cycle de marée montre une faible variation ($\Delta\alpha = 0,3$ en moyenne).

Cependant, bien que le modèle soit forcé par des conditions réalistes de vent et marée, il ne prend pas en compte les conditions extrêmes survenues lors du déploiement de l'ADCP. Les mesures de l'intensité du vent font état de périodes successives de calme et de tempête avec des amplitudes de vent de l'ordre de 15 m/s et des hauteurs de vagues de 1,4 m. L'analyse des séries de vitesse de courant enregistrées par ADCP a révélé une contribution significative des vagues induites par le vent sur les spectres des fluctuations de vitesse dans la couche de surface (Korotenko et al., 2012). Ceci justifie les fortes variations dans l'estimation de α à partir des données expérimentales (Tab. 2.4).

Les séries temporelles des vitesses enregistrées par ADCP et modélisées ont été comparées (Fig. 2.32). Les évolutions des vitesses observées et modélisées sont en phases. Par ailleurs le modèle reproduit précisément les variations semi-mensuelles et l'inégalité journalière. La concordance avec l'observation est meilleure pour la composante méridionale v

		Pic vel. -1h	Pic vel.	Pic vel. +1h	$\langle\alpha\rangle$	$\Delta\alpha$
Flot	ADCP	5,6	6,1	6,5	6	1,1
	Modèle	5,6	6,2	6,7	6,1	0,3
Jusant	ADCP	6	7,1	7,5	6,9	1
	Modèle	6,2	7,4	7,6	7	0,2

TAB. 2.4 – Coefficient α résultant de l'approximation des profils de vitesse par une loi de puissance, au cours du trois périodes spécifiques autour du pic de vitesse, en flot et en jusant. L'écart-type $\Delta\alpha$ est estimé en considérant les profils moyennés sur 20 minutes à partir des mesures ADCP et du modèle.

que pour la composante zonale u . Globalement, on peut constater que le modèle surestime l'amplitude moyenne de courant de 20% pendant le jusant tandis que pendant le flot, les vitesses observées et modélisées sont très proche (écart de 1%).

La Fig. 2.33 montre les histogrammes des occurrences cumulatives des amplitudes de vitesse provenant des observations et du modèle. En moyenne, les vitesses modélisées (flot et jusant compris) sont légèrement surestimées (de 5%) avec une exception pour les vitesses très faibles ($< 0,35$ m/s). Pour cette gamme, les valeurs des vitesses modélisées sont inférieures à celles observées.

La variation de la vitesse dans la colonne d'eau peut être estimée en chaque point de la grille régulière en considérant l'approximation des profils de vitesse ADCP par la loi de puissance $\tilde{V}(z)$ (section 1.4.2). Cependant cela suggère une hypothèse forte : l'évolution de la vitesse selon la verticale est la même dans tout le domaine d'étude. Cette hypothèse ne tient pas compte du coefficient de rugosité z_0 du fond marin. Ce coefficient est introduit dans l'expression $V(z) = \langle V \rangle (z/z_0 d)^{1/\alpha}$, alternative à la loi de puissance $\tilde{V}(z)$. Avec deux degrés de liberté, l'approximation des profils de vitesse par la relation $V(z)$ peut être différente, affectant ainsi l'estimation de la puissance disponible. Pour évaluer l'impact de

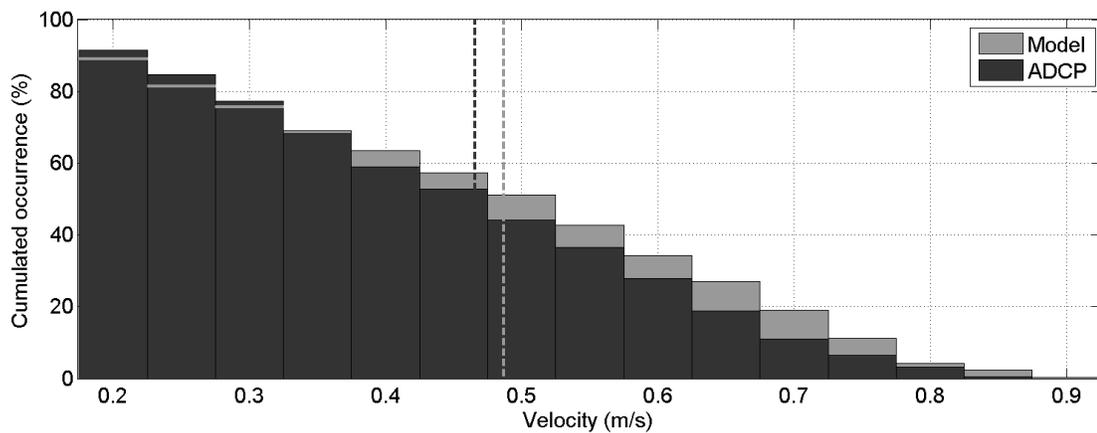


FIGURE 2.33 – Occurrences cumulatives des vitesses mesurées (noir) et modélisées (gris) à l'emplacement de l'ADCP déployé en juin 2009 (triangle rouge sur la Fig. 2.24). Les lignes en pointillé gris et noir indiquent les vitesses moyennes.

z_0 (mm)	Pic vel. -1h	Pic vel.	Pic vel. +1h
0,2	15	13	12
0,3	8	7	6
0,4	3	3	2
0,5	3	3	2

TAB. 2.5 – Erreur relative ε (%) résultant de l’approximation des profils de vitesse ADCP par la loi de puissance $V(z)$ pour 4 valeurs de coefficient de rugosité $z_0 = 0,2; 0,3; 0,4;$ et $0,5$ mm, au cours des trois périodes autour du pic de vitesse.

la rugosité du fond marin sur la forme du profil de vitesse, les profils approximatés par $V(z)$ ont été générés pour les valeurs de $z_0 = 0,2; 0,3; 0,4;$ et $0,5$ mm, permettant de couvrir des types de fonds marins très variés. Le décalage entre la loi de puissance et les profils réels, estimé en terme d’erreur relative ε , est reporté dans le Tab. 2.5. Le meilleur fit ($\varepsilon \sim 2\text{-}3\%$) est obtenu pour $z_0 = 0,4$ et $0,5$ mm. Ces valeurs sont représentatives de fonds composés de sable et de graviers (Soulsby, 1997) et correspondent à la nature du fond marin en Manche. La plus faible valeur de z_0 semble inappropriée pour la zone. L’approximation est légèrement meilleure pour la période suivant le pic de vitesse ($\varepsilon \sim 2\%$). À titre de comparaison, l’approximation du profil à l’aide de la relation $\tilde{V}(z)$ révèle une erreur ε de 2% pour les trois périodes autour du pic de vitesse. Ce résultat conforte notre choix de l’expression $\tilde{V}(z)$ et fournit également un intervalle d’erreur sur l’approximation de la vitesse pouvant affecter l’estimation de puissance.

2.3.3.5 Ressources hydrocinétiques

En supposant que le profil de vitesse suit une loi en $1/6^{\text{ème}}$ pendant le flot et en $1/7^{\text{ème}}$ pendant le jusant, les séries temporelles de densité de puissance cinétique P ont été générées dans la couche supérieure et inférieure de la colonne d’eau (première et deuxième moitié respectivement).

Dans la couche supérieure (Fig. 2.34a) la densité de puissance cinétique moyenne $\langle P \rangle$ atteint $0,9 \text{ kW/m}^2$ dans le secteur nord-est, avec des valeurs maximales P_{max} de 5 kW/m^2 .

Dans le reste du domaine d'étude, la puissance moyenne est plus faible, variant de 0,1 à 0,6 kW/m². Dans la couche inférieure (Fig. 2.34b), la valeur maximale de la puissance moyenne (0,3 kW/m²) est également atteinte dans le secteur nord-est. Globalement, la puissance dans cette couche est trois fois plus faible que celle disponible dans la couche supérieure. Dans le secteur nord-est, $\langle P \rangle$ augmente considérablement en vive-eau pour atteindre 2,2 kW/m² et 0,7 kW/m² dans la couche supérieure et inférieure respectivement.

La Fig. 2.35 représente l'évolution la densité de puissance cinétique dans la couche supérieure, aux points A et B, au cours d'une journée et d'un mois. L'échelle journalière révèle une variabilité semi-diurne et une inégalité significative de P . Cette inégalité résulte de l'asymétrie des vitesses de courant, supérieure en A ($a = 1,6$) qu'en B ($a = 1,1$). Les pics de puissance pendant le flot sur les sites A et B sont respectivement 3 et 2 fois plus élevés que pendant le jusant. Pour la période d'un mois, deux cycles de marée de vive-eau sont observés (Fig. 2.35b). En vive-eau, la puissance cinétique moyenne atteint 1,5 kW/m² pour le vive-eau primaire et 1,15 kW/m² pour le vive-eau secondaire. En B, ces valeurs respectives atteignent 1,2 kW/m² et 0,5 kW/m². Enfin, la densité de puissance cinétique moyenne mensuelle est deux fois supérieure en A qu'en B (0,9 kW/m² et 0,5 kW/m² respectivement).

Les séries temporelles de vitesse, moyennées dans la couche supérieure et inférieure de la colonne d'eau, ont été utilisées pour les estimations présentées ci-dessus. La valeur moyenne résulte de l'approximation des profils de vitesse par la loi de puissance. L'analyse des données ADCP a montré des profils moyens de flot et de jusant sensiblement différents (Fig. 2.31). En combinant les expressions de la densité de puissance cinétique P (Éq. 1) et de la variation verticale de vitesse $\tilde{V}(z)$ (Éq. 1.11), il est possible d'exprimer la variation de puissance avec la profondeur et en fonction du temps :

$$P(z, t) = \frac{1}{2} V_0(t)^3 \left(\frac{z}{d}\right)^{3/\alpha} \quad (2.5)$$

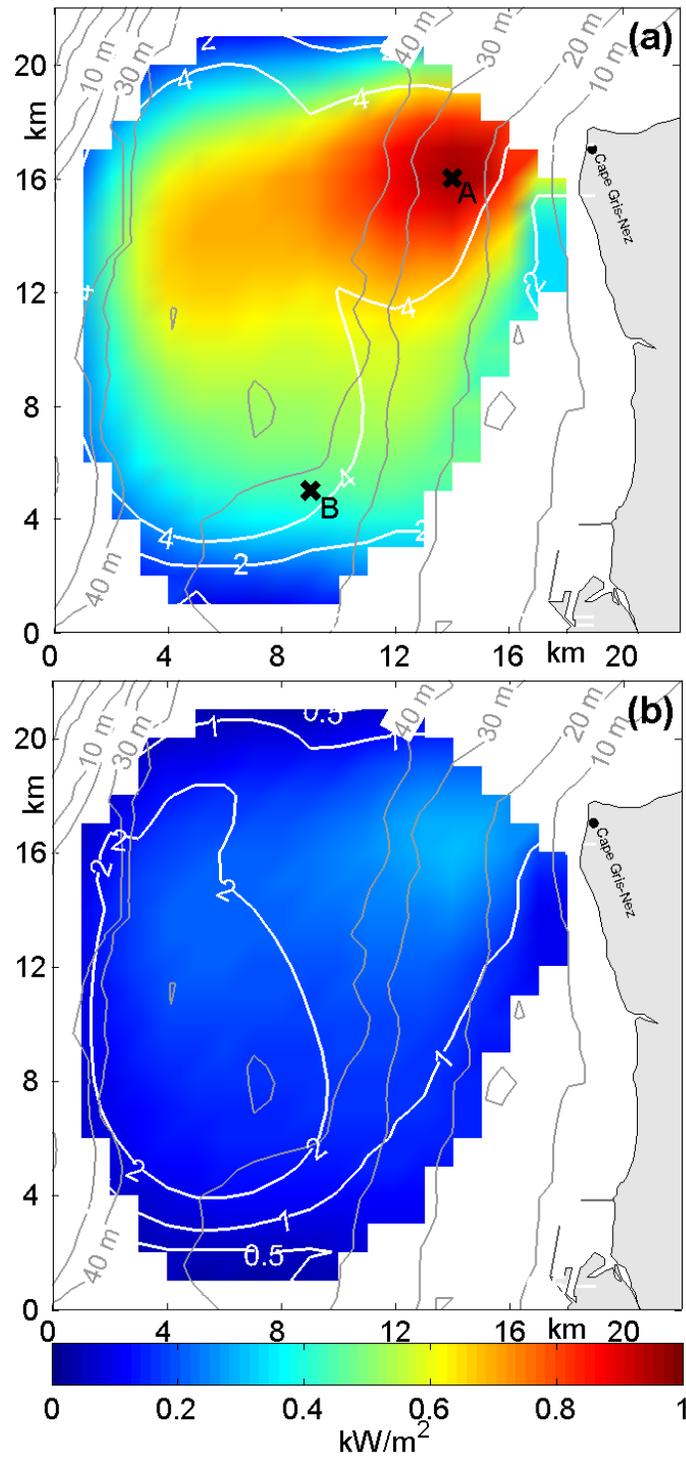


FIGURE 2.34 – Densité de puissance cinétique $\langle P \rangle$ moyenne (code couleur) et maximale (contour blanc) de l'écoulement, disponible dans la couche supérieure (a) et inférieure (b). Les croix indiquent la position de points de grille ayant fait l'objet d'une étude détaillée.

Les mesures radars de la vitesse de surface $V_0(t)$ peuvent ainsi être utilisées pour l'évaluation de puissance à différentes profondeurs et à différentes échelles spatio-temporelles. La variation de puissance avec la profondeur a été établie en considérant un loi en $1/6^{\text{ème}}$ pendant le flot et en $1/7^{\text{ème}}$ pendant le jusant.

Afin d'évaluer l'impact de α sur l'estimation de puissance, les loi en $1/7^{\text{ème}}$ et $1/5^{\text{ème}}$ ont été utilisées pour l'estimation de la puissance pendant la phase de flot (courbes en pointillé sur Fig. 2.36). Dans la couche supérieure et inférieure, l'écart dans l'estimation de la puissance est de 2% et 11% respectivement. En considérant la puissance moyenne sur la colonne d'eau, cet écart est de 6%.

À l'image de l'étude menée en mer d'Iroise, la puissance théorique P_{th} pouvant être générée par un récupérateur d'énergie et la puissance techniquement exploitable P_{exp} ont été estimées en considérant un système à double hélice MCT Seagen (Fig. 0.5) de puissance nominale 1,2 MW, hypothétiquement installé au point A, à 6 km du CGN. Compte tenu de

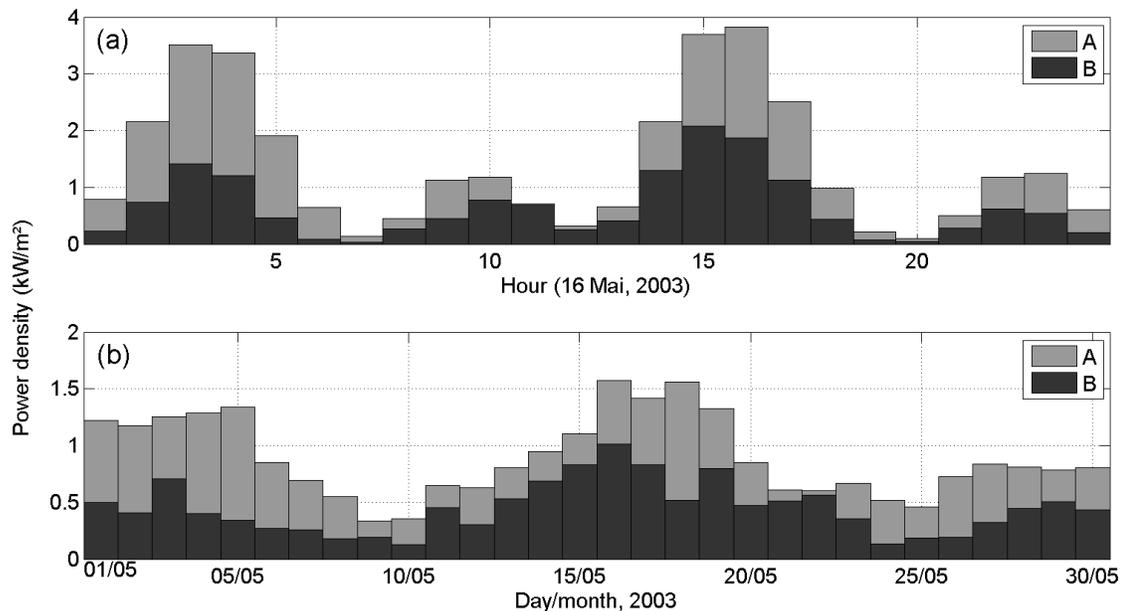


FIGURE 2.35 – Évolutions horaires et journalières de la densité de puissance cinétique au cours d'une journée (a) et d'un mois (b) dans la couche supérieure, aux points A (gris) et B (noir).

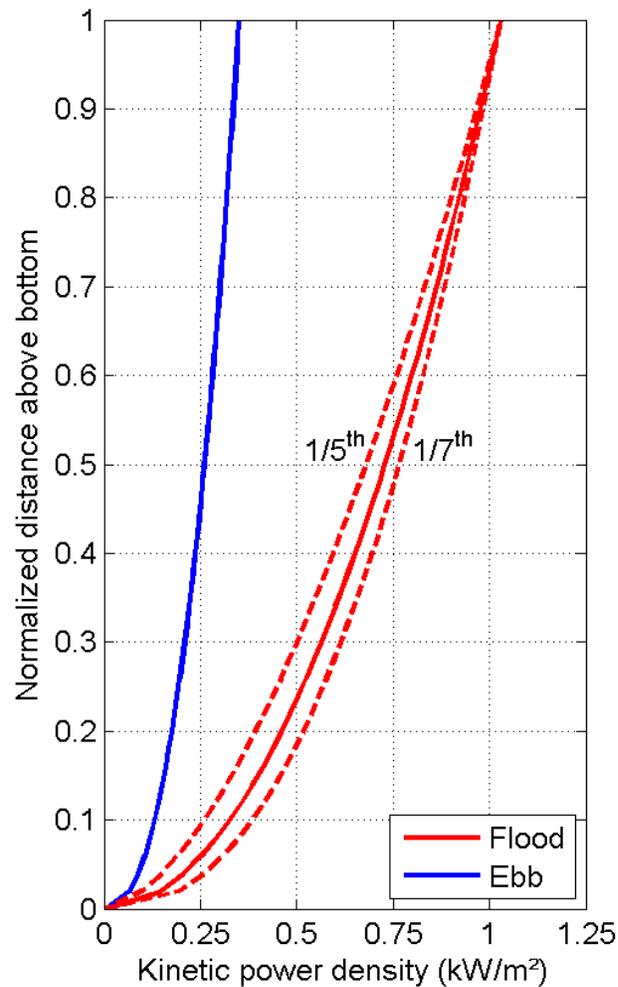


FIGURE 2.36 – Profils verticaux moyens de la puissance cinétique disponible sur le site A, en flot et en jusant, obtenus à partir de la loi de puissance en $1/6^{\text{ème}}$ et $1/7^{\text{ème}}$ respectivement. Les courbes en pointillé montrent les profils moyens provenant des lois en $1/5^{\text{ème}}$ et $1/7^{\text{ème}}$ ($\pm\Delta\alpha$).

la faible profondeur du site (30 m), le rotor était situé au milieu de la colonne d'eau, ainsi l'hydrolienne opérait dans toute la colonne d'eau (Fig. 2.37).

La variabilité temporelle de P_{th} et de P_{exp} est gouvernée par le cycle de marée vive-eau/ morte-eau (Fig. 2.38). La puissance théorique P_{th} évolue dans une gamme (0,10 - 0,45 MW) plus étendue que la puissance techniquement exploitable P_{exp} (0,02 - 0,15 MW). Globalement P_{th} est trois fois supérieure à P_{exp} avec une valeur moyenne mensuelle de 0,25

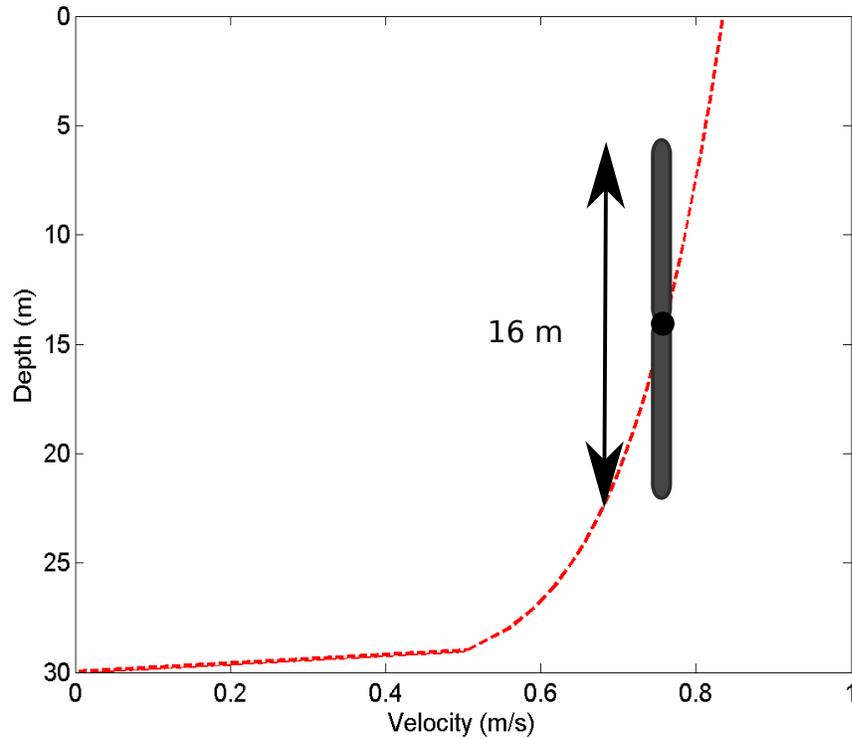


FIGURE 2.37 – Position du système MCT Seagen opérant dans toute la colonne d’eau au point A, à l’ouest du CGN. Le profil vertical de vitesse a été généré en considérant la loi de puissance déduite de l’étude statistique des données ADCP.

MW et 0,08 MW respectivement.

Enfin, la puissance annuelle pouvant être générée par un réseau de 20 MCT Seagen centré au point A (Fig. 2.39) et opérant dans toute la colonne d’eau a été estimée à 10 GWh.

2.4 Conclusions

En dépit d’une utilisation massive, le recours à la modélisation numérique (e.g. [Blunden et al., 2013](#), [Neill et al., 2014](#), [Guillou et Thiébot, 2016](#)) pour l’estimation du potentiel hydrocinétique fournit encore des résultats contestables. Bien qu’étant capable d’évaluer le

potentiel sur des zones très étendues (Robins et al., 2015), la conceptualisation simpliste des phénomènes réels, intrinsèque à cette méthode, lui confère, au mieux, un statut de complément dans la caractérisation du potentiel d'énergie tidale d'un site EMR. Ces modèles ne peuvent, à eux seuls, fournir des résultats absolus. La connaissance des conditions hydrodynamiques d'un site EMR nécessite l'acquisition et l'interprétation de mesures des courants marins. Ceci de manière à intégrer la complexité de la réalité spécifique au site.

L'estimation du potentiel hydrocinétique à partir de mesures de courant a constitué l'un des quatre piliers du programme européen Pro-Tide, co-financier de cette thèse. Pour répondre aux objectifs fixés par le projet, une nouvelle méthodologie pertinente de quantification d'énergie marine a été élaborée et présentée dans ce chapitre. L'originalité des résultats obtenus réside dans l'utilisation conjointe de systèmes de mesure de courant par radars et ADCPs pour l'estimation du potentiel d'énergie tidale.

Deux radars HF déployés sur les côtes bretonnes depuis 2006 ainsi que le déploiement de deux radars VHF sur les côtes du détroit du Pas-de-Calais au printemps 2003, ont permis d'étudier la circulation du courant de surface sur une zone étendue : jusqu'à 140 km au large, en mer d'Iroise et jusqu'à 25 km, dans le détroit du Pas-de-Calais. En utilisant les

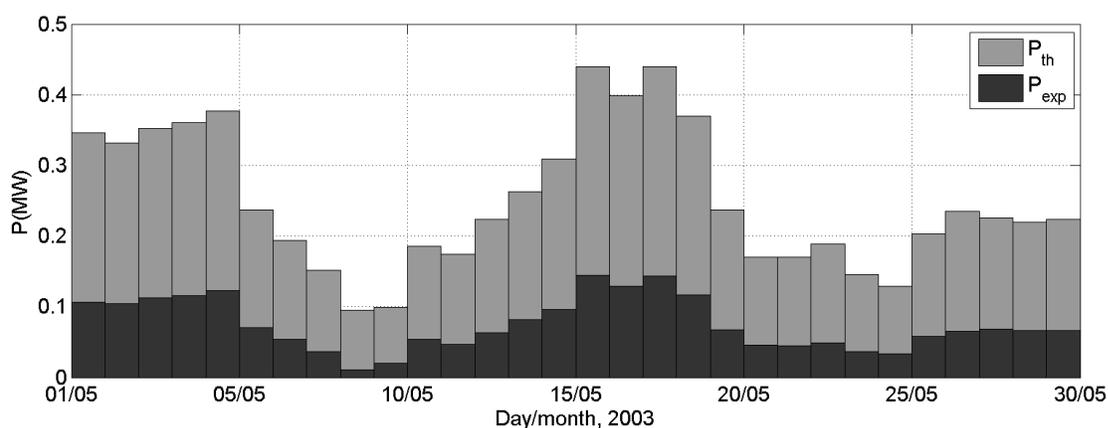


FIGURE 2.38 – Évolution de la puissance théorique P_{th} (gris) et techniquement exploitable P_{exp} (noir) générées par un système MCT Seagen sur la base d'une moyenne journalière, pendant une période d'un mois, au point A, à l'ouest du CGN.

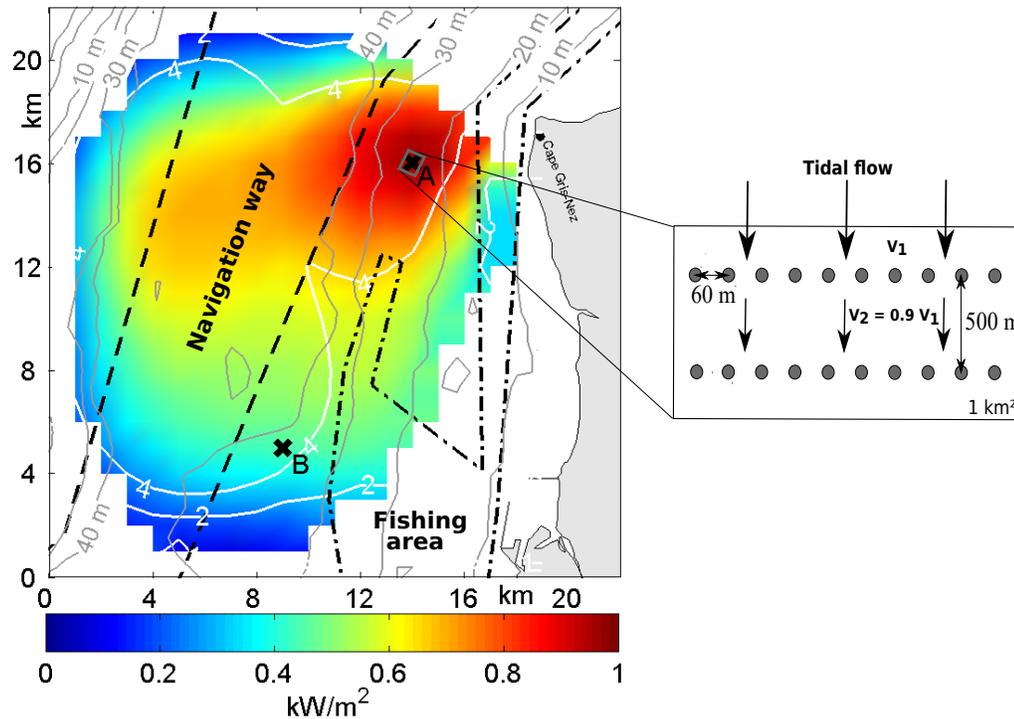


FIGURE 2.39 – Configuration du réseau de 20 hydroliennes MCT Seagen installé à l’ouest du Cap Gris-Nez sur une superficie de 1 km^2 (rectangle gris).

avantages de la technologie radars (couverture spatiale étendue, haute résolution, acquisition continue de données), l’ensemble des paramètres de l’écoulement (vitesse moyenne et maximale, asymétrie des vitesses et de direction de courant, densité de puissance cinétique), établis par le Centre Européen de la Recherche Marine (Legrand, 2009), ont été quantifiés. En complément des données radars, les profils verticaux de vitesse, obtenus par ADCP ont été établis, permettant de quantifier la ressource hydrocinétique en trois dimensions.

Les secteurs les plus énergétiques de chaque région ont été identifiés. En mer d’Iroise, les courants les plus forts ont été observés au centre du passage du Fromveur et dans une zone au nord-ouest de l’île d’Ouessant. Sur chaque site, la vitesse moyenne de vive-eau atteint $1,7 \text{ m/s}$ avec une vitesse maximale supérieure à 4 m/s . Dans le détroit du Pas-de-Calais, le secteur le plus énergétique a été localisé à 6 km au large du Cap Gris-Nez. Ici, la vitesse moyenne de vive-eau est de $1,4 \text{ m/s}$ pour une vitesse maximale de $2,5 \text{ m/s}$.

	Centre Fromveur		Nord-ouest de Ouessant		Cap Gris-Nez
	Couche sup.	Couche inf.	Couche sup.	Couche inf.	Colonne d'eau
$\langle P_{th} \rangle$ (kW)	1 200	700	900	550	250
$\langle P_{exp} \rangle$ (kW)	400	250	300	200	80

TAB. 2.6 – Valeurs moyennes mensuelles de la puissance théorique $\langle P_{th} \rangle$ et techniquement exploitable $\langle P_{exp} \rangle$ estimées dans la couche supérieure et inférieure de la colonne d'eau au centre du passage du Fromveur et au nord-ouest de l'île d'Ouessant et dans toute la colonne à 6 km à l'ouest du Cap Gris-Nez.

Sur chacun de ces trois sites, la puissance théorique P_{th} et techniquement exploitable P_{exp} par un récupérateur MCT Seagen de puissance nominale 1,2 MW ont été estimées. Le récupérateur était supposé opérer dans la couche supérieure et inférieure de la colonne d'eau pour les deux sites en mer d'Iroise et dans toute la colonne d'eau pour le site dans le détroit du Pas-de-Calais. Globalement, seul 1/3 de la puissance théorique générée par l'hydrolienne est réellement convertie en électricité, ceci quelque soit la profondeur dans laquelle opère le récupérateur. Par ailleurs, bien que l'hydrolienne était supposée opérer dans toute la colonne d'eau dans le détroit du Pas-de-Calais, la puissance pouvant y être générée est 4 à 5 plus faible que celle générée par un récupérateur opérant dans la couche supérieure de la colonne d'eau sur les deux sites en mer d'Iroise et 2 à 3 plus faible pour un système opérant dans la couche inférieure. Toutefois, le potentiel dans le détroit du Pas-de-Calais ne doit pas être négligé, celui-ci étant comparable au potentiel estimé dans certaines mers nord-européenne (mer d'Irlande, mer d'Écosse) (Robins et al., 2015).

La puissance évaluée sur les deux sites en mer d'Iroise confirme le potentiel considérable de cette région en matière d'énergie tidale et justifie l'ambition affichée par la société Sabella de s'y implanter durablement. Suite au succès de la première campagne d'essai du système D10 (Fig. 0.7) immergé pendant 12 mois (juillet 2015 - juillet 2016) au centre du passage du Fromveur, Sabella prévoit l'immersion de trois autres machines plus puissantes (D15) dans le cadre d'une ferme hydrolienne pilote baptisée « Eussabella ». Ce projet ambitionne de fournir à l'horizon 2019 la totalité des besoins en électricité de l'île d'Ouessant,

faisant de cette région insulaire, la première île au monde totalement alimentée par l'énergie des courants de marée.

Enfin, les données récoltées par radars et ADCPs ainsi que la méthode d'estimation employée tout au long de ce chapitre ont prouvé leur efficacité dans l'estimation du potentiel hydrocinétique d'un site EMR. Le déploiement de systèmes radars HF occupe d'ailleurs une place essentielle dans l'ANR HYD2M visant à étudier les propriétés hydrodynamiques du Raz Blanchard. Ce système à moindre coût, sera couplé à la modélisation numérique pour reconstituer les profils verticaux de vitesse de courant. Cette association observations/modélisations contribuera à fiabiliser la prévision de la ressource hydrocinétique dans un environnement physique très complexe, abritant l'un des potentiels les plus élevés au monde.

Étude de la circulation de marée au large du port de Douvres et de Yarmouth, au sud de l'Angleterre

Nota : Ce chapitre a fait l'objet d'une partie du livre *"The Ocean in Motion"* édité par Springer.

3.1 Introduction

Au Royaume-Uni, la grande majorité de la production d'électricité provient des combustibles fossiles (68%) et du nucléaire (19%). Néanmoins, cet état de fait ne doit pas occulter les efforts entrepris ces dernières années pour le développement des énergies alternatives. Avec le « Feed-in Tariff » mis en place en 2010 pour favoriser les petits producteurs et l'instauration, en 2012, d'un système de soutien aux énergies renouvelables basé sur les certificats verts dits « ROCs » (Renewable Obligation Certificate System), la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique britannique est passée de 4% en 2002 à 25% en 2016. Bien que les sources conventionnelles restent largement majoritaires, le gouverne-

ment britannique semble bien décidé à poursuivre son soutien aux filières renouvelables. Son objectif étant d'atteindre une part d'énergie renouvelable de 30% d'ici à 2020 dans la production d'électricité.

En matière d'énergie marine (éolien offshore, marémotrice, houlomotrice et hydrolienne), le Royaume-Uni peut potentiellement répondre à hauteur de 15% à 20% de la demande en électricité du pays. Disposant du plus fort potentiel hydrolien d'Europe, de solides programmes R&D (recherche et développement) et des équipements à la pointe de la technologie ont naturellement émergés ces dernières années, faisant du Royaume-Uni, le leader européen en la matière. Le meilleur exemple de l'hégémonie britannique est celui du projet MeyGen de la société Atlantis qui ambitionne la création d'un parc hydrolien de 270 turbines dans le Pentland Firth au nord de l'Écosse. Avec une capacité totale installée de 398 MW à l'horizon 2020, le parc hydrolien devrait devenir le plus grand à l'échelle mondiale. Témoin de l'état d'avancement du projet, Atlantis lançait au début de l'année 2017, la deuxième phase de développement avec l'installation des quatre premières hydroliennes. L'optimisme affiché par Atlantis quant à la finalité de ce projet contraste avec celui entrepris par Siemens au large du Pays de Galles. En 2014, Siemens était contraint de suspendre son projet de développement d'un parc hydrolien de 10 MW, faute de fonds suffisants.

Le développement de l'exploitation de l'énergie des courants de marée au Royaume-Uni passe également par la participation à des programmes aux moyens financiers plus limités. Le contribution des britanniques au projet européen Pro-Tide en est le parfait exemple. À travers ce projet, les autorités régionales de l'île de Wight (Isle of Wight Council) et celles du port de Douvres, se sont fixées un objectif commun : étudier la faisabilité de l'installation d'un parc hydrolien à proximité de chacune de ces zones.

L'île de Wight ambitionnait la création d'un centre d'essai et de démonstration de systèmes de récupération d'énergie tidale. Bien que le site privilégié pour l'installation d'un tel centre ait été identifié au sud de l'île de Wight, d'autres emplacements ont été envisagés, notamment dans une zone située dans la partie ouest du détroit du Solent, au large du port

de Yarmouth. Cependant, l'absence totale de données de mesure de courant de qualité dans cette région empêchait de tirer des conclusions sur la capacité, d'un point de vue énergétique, d'y implanter un réseau de test de systèmes de récupération.

En tant que partenaire du projet Pro-Tide, le LOG a apporté son expertise dans la mesure des courants afin de fournir une première évaluation de la circulation de marée dans la zone. Cette étude a permis de révéler de manière succincte, le meilleur site d'installation de récupérateurs d'énergie.

L'objectif des autorités du port de Douvres était plus modeste. Il visait à établir la faisabilité technique et économique de l'implantation d'un réseau d'hydroliennes, d'une capacité installée de 0,99 MW, dans une zone à proximité du port de Douvres. L'évaluation de la dynamique de marée qui règne dans la zone a été confiée au cabinet d'étude DHL. La simulation des vitesses de courant par un modèle numérique 2D a permis de localiser le secteur le plus favorable à l'implantation d'un parc hydrolien. Dans une perspective de validation des résultats, le LOG s'est vu confier la tâche de confronter les résultats du modèle à des mesures de courant.

Les mesures réalisées par le LOG dans le détroit du Solent et au large du port de Douvres ont été effectuées au moyen d'un dispositif innovant d'ADCP tracté. Le traitement des mesures récoltées par cet outil permet d'établir des cartographies des vitesses de courant de la zone investiguée ([Sentchev et Yaremchuk, 2016](#)) et de fournir une première évaluation de la circulation de marée. Les résultats obtenus sont présentés dans ce chapitre.

3.2 Méthodologie expérimentale

L'étude de courantométrie menée au large du port de Douvres et de Yarmouth a été effectuée à l'aide d'un ADCP, installé sur une plateforme expérimentale. Le tout était tracté par une petite embarcation de type zodiac (Fig. 3.1). La plate-forme était dotée de deux tubes cylindriques de 1,8 m de long et de 0,22 m de diamètre assemblés sur un châssis en

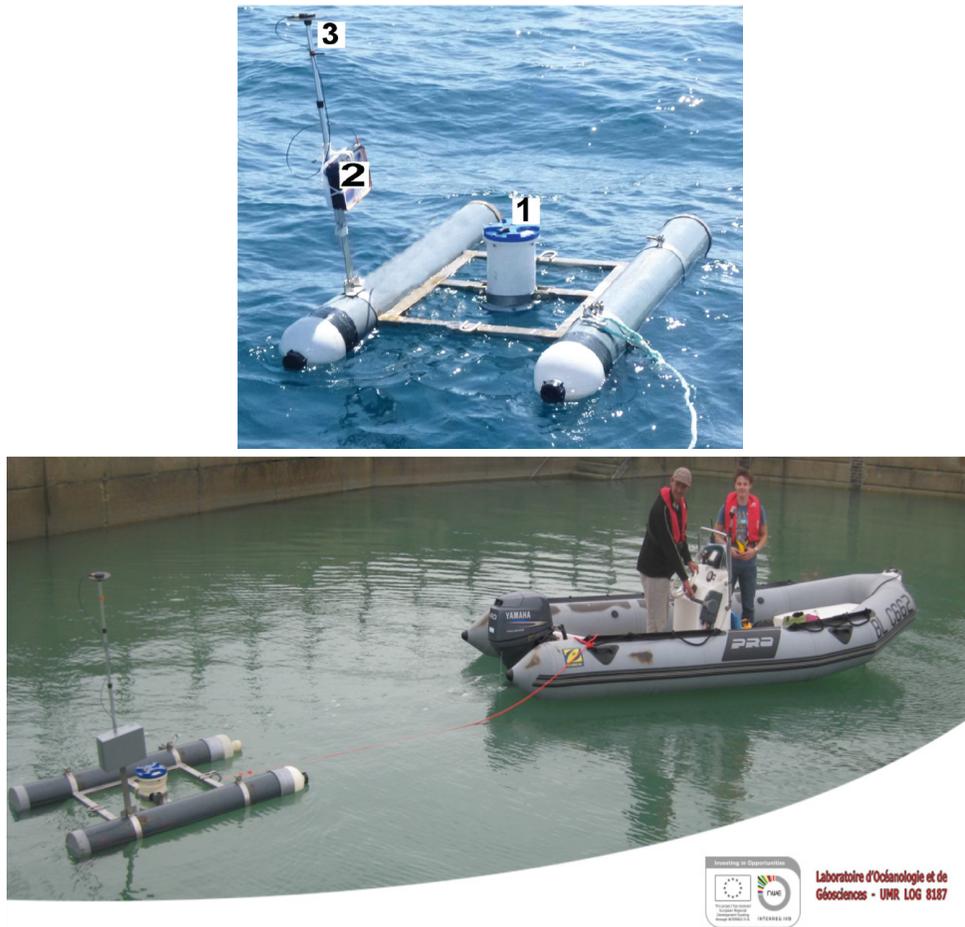


FIGURE 3.1 – Système Kursk (panneau du haut) avec l’ADCP (1), le GPS de haute précision et le module d’acquisition de données (2) et l’antenne GPS (3). Le panneau du bas représente le système Kursk tracté par un zodiac.

acier inoxydable de dimension 0,8x0,8 m. La distance entre la plate-forme et le bateau était contrôlée par une dérive latérale permettant d’éviter la contamination de l’enregistrement des vitesses de courant par le sillage du bateau. Deux ailerons fixés à l’arrière des tubes, assuraient la stabilité de la propulsion de la structure vers l’avant.

La tête de l’ADCP était située à environ 0,2 m sous la surface de l’eau, le troisième faisceau étant aligné le long de l’axe de la plate-forme. Le « blanking space » a été fixé à 0,3 m et la distance entre chaque bin à 0,5 m, le centre du premier bin se situait à environ 0,75 m. Les profils de vitesse ont été obtenus dans toute la colonne d’eau. L’ADCP était

programmé pour fonctionner à une fréquence de 1 Hz. Le profilage de la vitesse était effectué toutes les secondes. Chaque ping (impulsion sonore) pour la vitesse étant composé de trois sub-pings moyennés dans un intervalle d'une seconde, fournissant une erreur de vitesse de 0,04 m/s. Un ping spécifique au suivi du fond marin a permis de corriger le mouvement du bateau et de reconstituer, à partir des vitesses enregistrées, le vecteur courant dans le référentiel terrestre.

Au cours des différentes courantographies, la vitesse du bateau variait de 2 à 4 m/s. Les données enregistrées par l'ADCP ont été couplées aux données GPS à haute résolution. Le système de géolocalisation GENEQ Sxblue, installé sur le côté droit de la plate-forme (Fig. 3.1), enregistrerait la position de l'ADCP à une fréquence d'acquisition de 1 Hz, offrant ainsi une précision nominale de positionnement supérieure à 1 m.

3.3 Étude de la circulation de marée au large du port de Yarmouth

3.3.1 Contexte de l'étude

Une partie des actions menées dans le cadre du projet Pro-Tide visait à identifier les zones propices à l'installation de site de démonstration de récupérateurs d'énergie tidale autour de l'île de Wight. À partir d'un modèle numérique 2D, le bureau d'étude « ITP Renewables » a révélé l'existence d'une large zone au sud de l'île, au sein de laquelle, la vitesse de courant en vive-eau atteint 3 m/s (Fig. 3.2). Ces résultats ont été confirmés par Robins et al. (2015) lors d'une étude numérique 3D (ROMS) sur la variabilité spatiale et temporelle de la ressource hydrocinétique des mers du plateau nord-européen.

Conscient du potentiel énergétique de cette zone, un consortium composé des autorités régionales de l'île de Wight et du bureau de conseil en gestion des affaires « TB Partners LLP » a fondé le Centre d'Énergie Tidale de Perpetuus (PTEC) (www.perpetuustidal.com) afin de répondre à l'objectif suivant : créer un parc hydrolien de 3 à 6 récupérateurs pour une capacité totale installée de 30 MW.

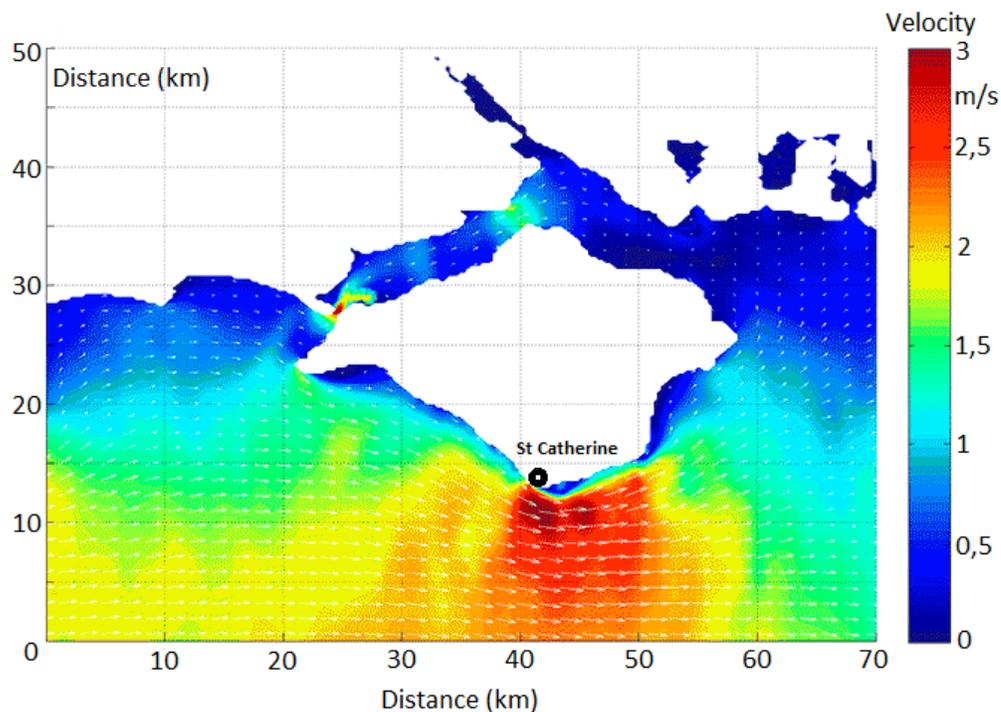


FIGURE 3.2 – Vitesse maximale du courant autour de l’île de Wight simulée par un modèle numérique 2D. Le cercle noir indique l’emplacement du point de Sainte Catherine. Source : ITP Renewables.

Sollicités par ce projet, des consultants indépendants en environnement (Royal Haskoning DHV) et des spécialistes sous-traitants, ont fourni un rapport formel d’une étude sur l’impact environnemental susceptible de survenir lors des phases de construction, d’exploitation, d’entretien et de démantèlement d’une telle installation. L’étude a révélé l’existence d’une zone de 5 km² à 2,5 km au sud du « point de Sainte Catherine » (Fig. 3.3), au sein de laquelle les conséquences sur l’environnement ont été qualifiées de « négligeable ».

Au cours de l’année 2016, plusieurs constructeurs ont manifesté leur intérêt quant à l’installation de leurs récupérateurs d’énergie sur le site de Perpetuus. Le début des travaux d’installation est espéré à l’automne 2017 avec une connexion au réseau électrique de l’île de Wight prévue l’année suivante.

Toutefois, ce site n’est pas le seul ayant une ressource hydrocinétique potentiellement

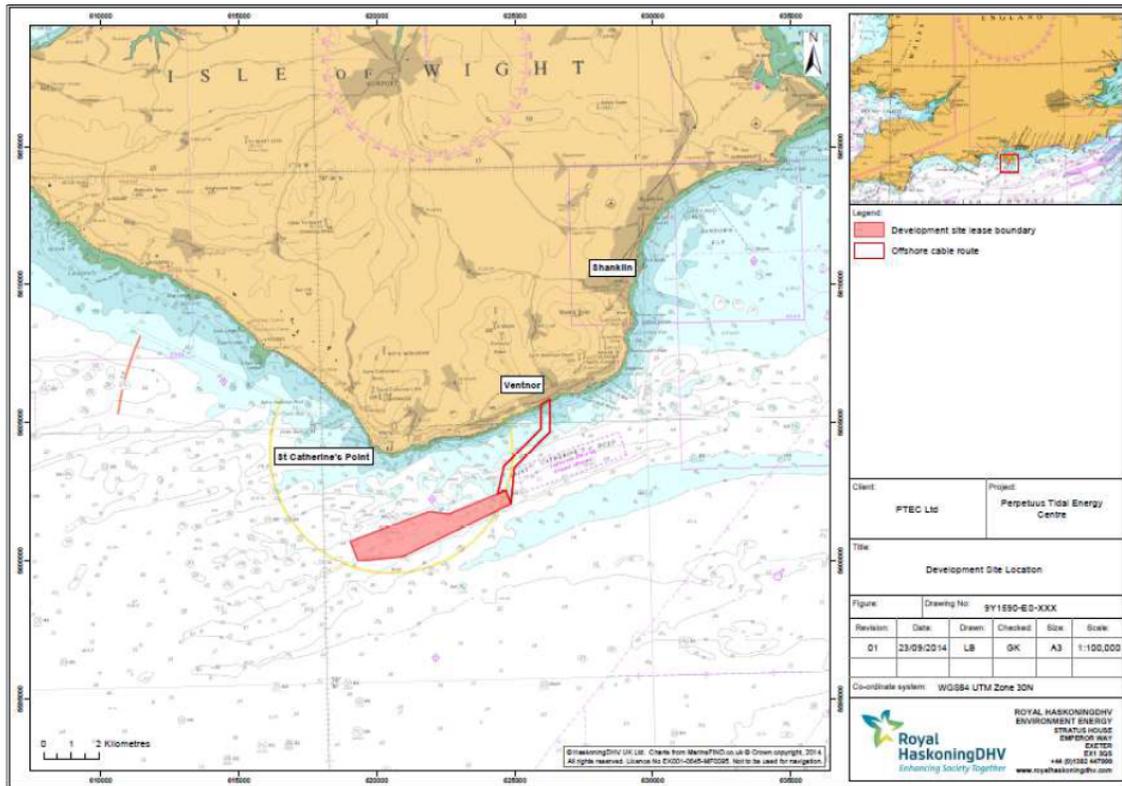


FIGURE 3.3 – Emplacement du site favorable à l’implantation d’un parc hydrolien. Source : www.royalhaskoningdhv.com.

importante. Les travaux de modélisation numérique du courant marin effectués par « ITP Renewables » font état d’un autre site à forts courants de marée, situé au nord-ouest de l’île de Wight (Fig. 3.2). Ce secteur est d’autant plus intéressant qu’il constitue une voie maritime relativement peu fréquentée. Seuls quelques voiliers naviguent dans cette zone.

Afin de valider les résultats du modèle numérique, le LOG a été sollicité par les autorités de l’île de Wight pour mener une rapide étude courantographique au large du port de Yarmouth (nord-ouest de l’île) (Fig. 3.4).

3.3.2 Site d’étude

Le site d’étude se situe au large du port de Yarmouth, dans la partie ouest du Solent (Fig. 3.4). Les phénomènes de marée y sont très complexes. La forme très caractéristique

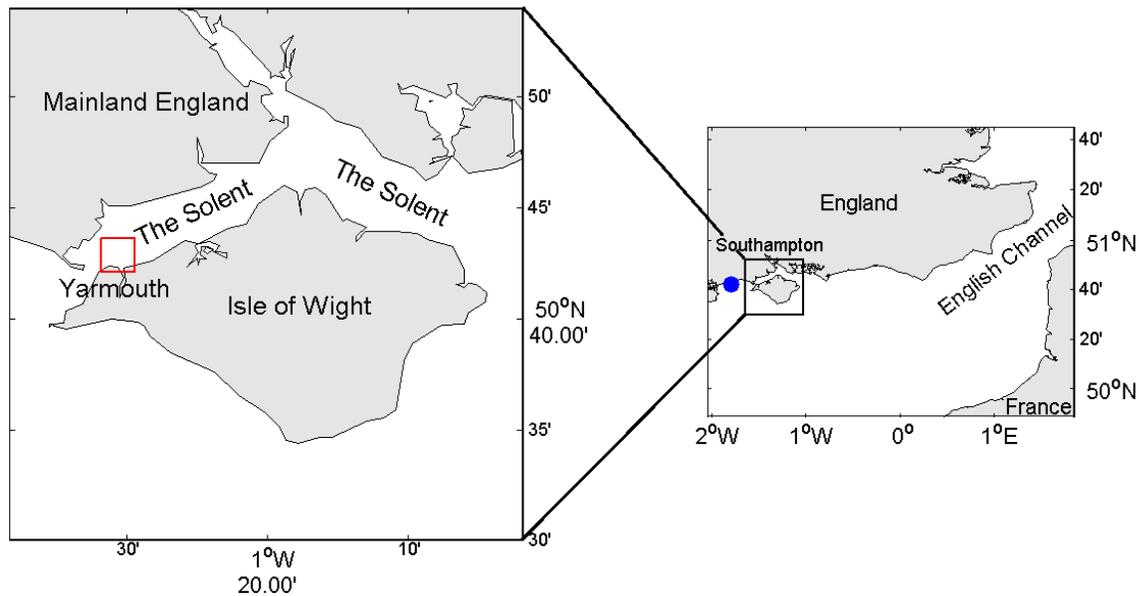


FIGURE 3.4 – Emplacement du port de Yarmouth dans le Solent et localisation de la zone investiguée par ADCP tracté (contour rouge). Le point bleu indique l'emplacement du point amphidromique.

de la marée à Southampton et Yarmouth est bien connue, avec sa « tenue du plein » de plus de deux heures. Cette particularité résulte de la déformation de la marée dans le Solent lui-même et, tout particulièrement, d'une interaction entre les ondes lunaires et solaires sous forme d'une oscillation transversale entre l'estuaire du Solent et les côtes anglaises. L'onde de marée, très déformée, génère une double pleine mer, le premier maximum apparaissant avant la pleine mer au sud de l'île de Wight (Dyer et King, 1975). Par ailleurs, Dyer et King (1975) ont relevé l'existence de périodes de trois heures au cours desquelles l'amplitude du courant de flot et de jusant est quasiment constante, révélant l'existence d'ondes six-diurnes (M_6 , $2MS_6$, $2SM_6$) dans le Solent. La présence d'un point amphidromique à une vingtaine de kilomètres de Yarmouth entraîne un marnage moyen plutôt faible de 2,7 m enregistré dans ce port (Dyer et King, 1975).



FIGURE 3.5 – Déploiement du système Kursk au large du port de Yarmouth.

3.3.3 Cadre expérimental

Le système Kursk a été déployé au large du port de Yarmouth, au cours de deux journées : le 1^{er} juillet 2015 et le 16 octobre 2015 (Fig. 3.5).

Durant l'été 2015, les mesures ont été réalisées avec un ADCP de 1 200 kHz. Une zone de 3,5 km² (délimitée par le rectangle rouge sur la Fig. 3.4) a été investiguée en effectuant quatre radiales successives, espacées de 500 m. Trois courantographies d'une durée d'une heure et demie ont été réalisées en condition de vive-eau. Les deux premières courantogra-

Date	1 ^{ère} marée	2 ^{ème} marée	3 ^{ème} marée	4 ^{ème} marée	Coeff.
1 ^{er} juillet 2015	04h10	11h00	16h33	23h07	88
	BM (0,7 m)	PM (3,2 m)	BM (0,7 m)	PM (3,4 m)	
16 octobre 2015	00h54	06h39	13h12	18h52	75
	PM (3,4 m)	BM (0,7 m)	PM (3,5 m)	BM (0,7 m)	

TAB. 3.1 – Heure de marée de basse mer (BM) et de pleine mer (PM) lors des deux jours de manipulation au large du port de Yarmouth. Le coefficient de marée pour chaque jour est également indiqué.

phies se sont déroulées 4,5 et 1,75 heures avant la basse mer alors que la dernière sortie a été effectuée 2,25 heures après la pleine mer.

Compte tenu de la profondeur maximale du site ($\simeq 50$ m), les deux courantographies réalisées en octobre 2015, ont été effectuées avec un ADCP de 600 kHz. À cette fréquence

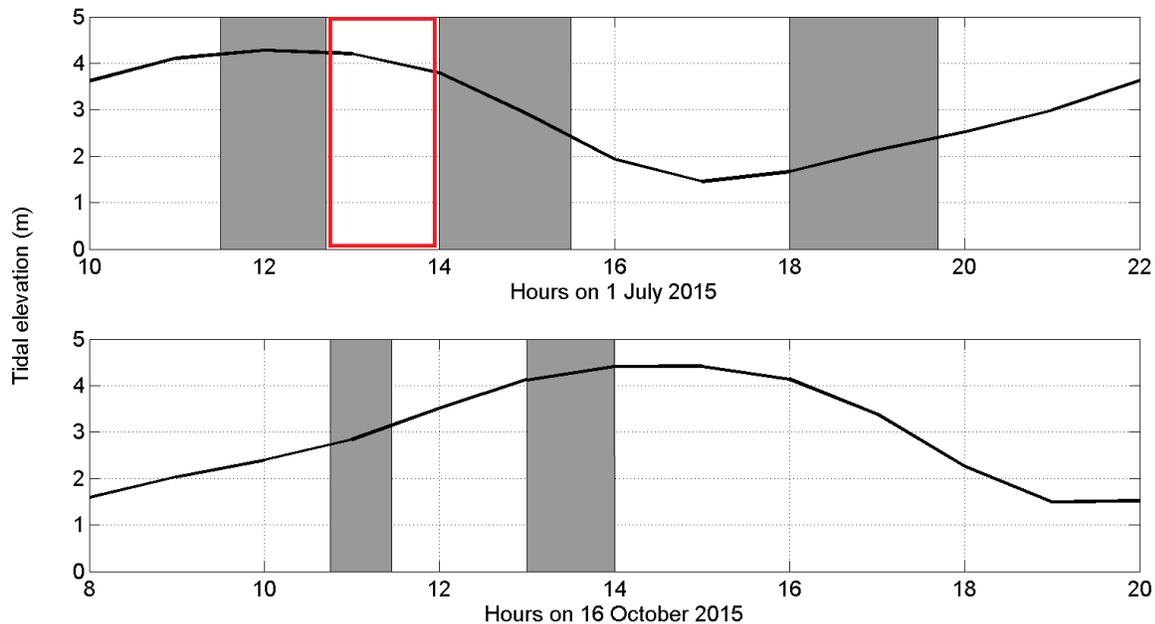


FIGURE 3.6 – Élévation du niveau de la mer simulée par le SHOM dans le port de Southampton à 15 km de Yarmouth, le 1^{er} juillet (haut) et le 16 octobre 2015 (bas). Les rectangles gris indiquent les périodes au cours desquelles les différentes courantographies ont été réalisées au large du port de Yarmouth. Le rectangle rouge indique la période de 70 minutes au cours de laquelle l’ADCP a été amarré à une bouée (voir Fig. 3.7 l’emplacement).

l’ADCP a pu enregistrer les vitesses de courant de la surface jusqu’au fond. La première et seconde courantographie se sont déroulées respectivement 1 heure avant la pleine mer et 1 heure après la pleine mer, en condition de marée moyenne. La table des marées pour les deux jours de campagnes de mesures est présentée dans le Tab. 3.1.

Après la récupération des données, les vitesses ont été moyennées sur 20-30 secondes, géolocalisées et interpolées sur une grille régulière de 50 m de résolution par la méthode 2dVar (Yaremchuk et Sentchev, 2009). Ainsi, des cartes du champ de vitesse ont pu être

générées à différents niveaux de profondeur.

Les horaires de sorties (UTC +1), la durée et l'heure à mi-parcours de chaque courantographie sont reportées dans le Tab. 3.2. Pour plus de lisibilité, chaque période de sortie en mer est représentée par un rectangle gris sur la Fig. 3.6.

3.3.4 Résultats

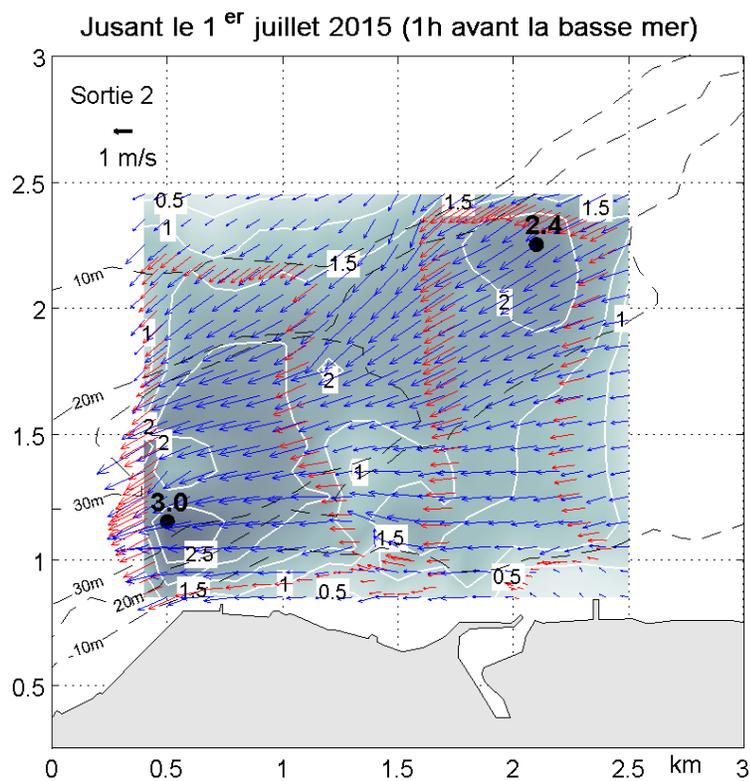
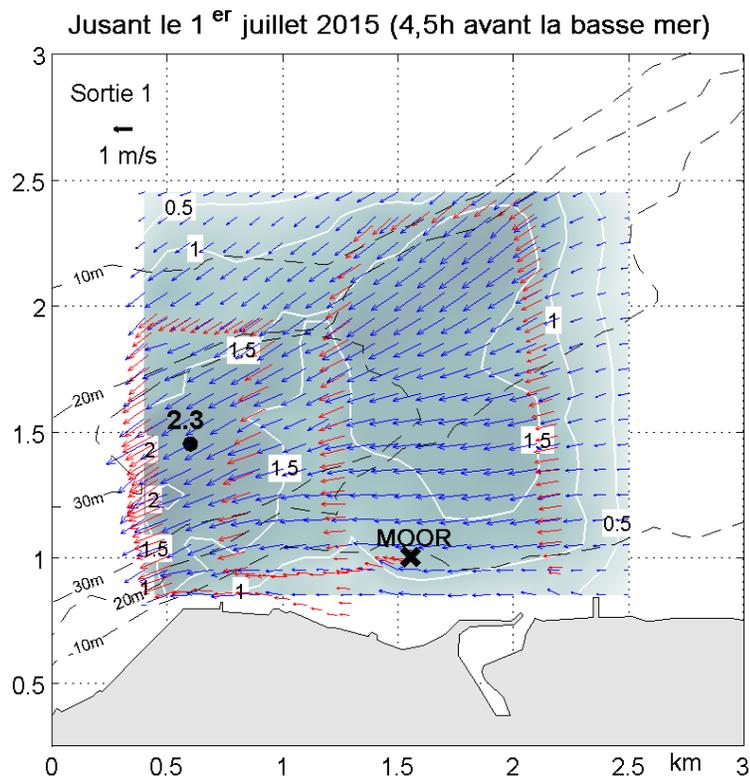
3.3.4.1 Cartographies des vecteurs courant, interpolation du champ de vitesse

Les flèches rouges sur la Fig. 3.7 montrent les vecteurs vitesses du courant de surface (à 1 m de profondeur) moyennés temporellement pour chaque courantographie menée au large du port de Yarmouth. Le champ de vitesse obtenu par la méthode 2dVar est représenté par les flèches bleues.

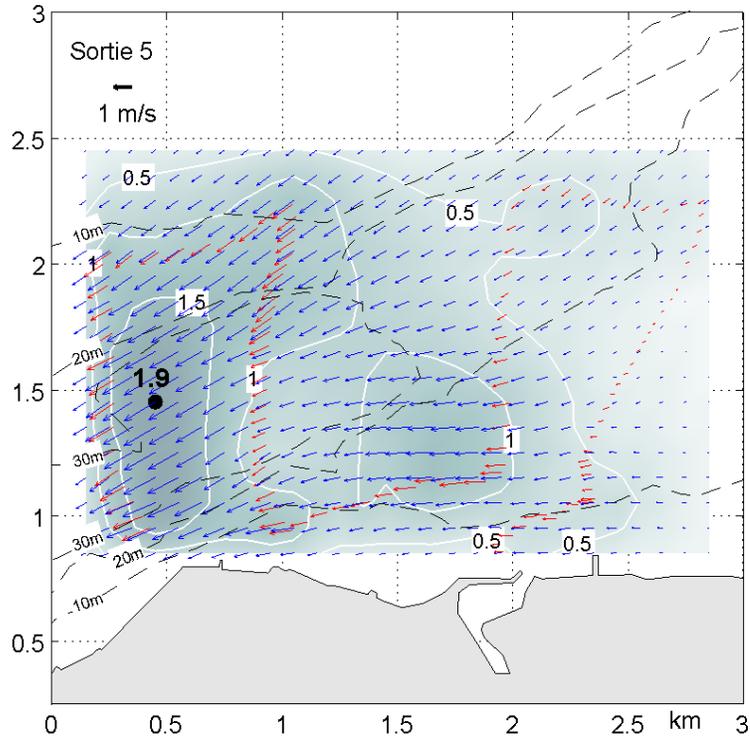
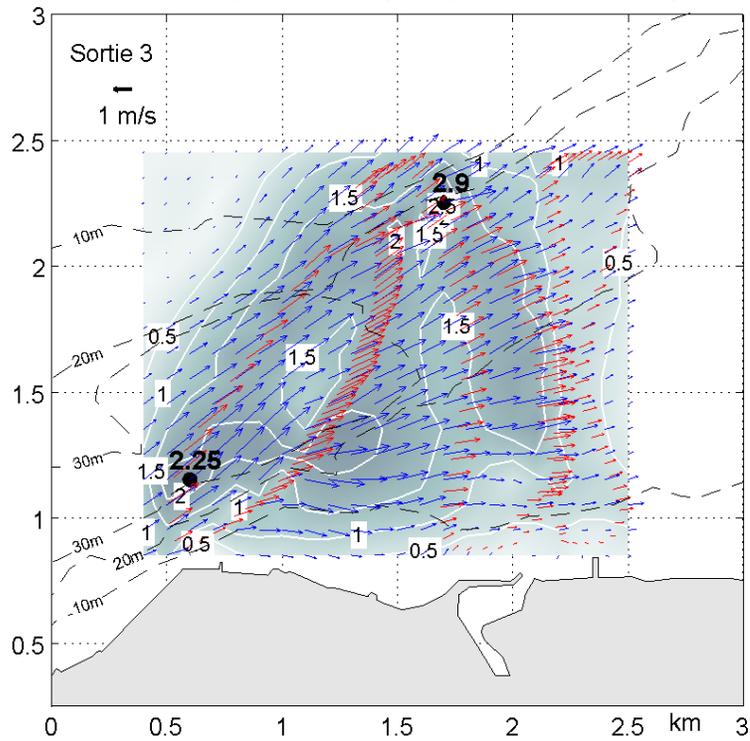
La Fig. 3.7 montre que la direction de l'écoulement pendant le flot est orienté sud-ouest vers nord-est et inversement pendant le jusant. Dans la majorité du domaine, la direction des vecteurs courant est gouvernée par la bathymétrie et la ligne de côte. Les vitesses les

Sortie	Horaires de sorties (UTC+1)	Durée (h)	Heure à mi-parcours	Nb. de pts de mesure de vitesse
1	1 juillet, 11h30 - 12h41 BM-5h - BM-4h	1,2	BM-4,5h	142
2	1 juillet, 14h00 - 15h30 BM-2,5h - BM-1h	1,5	BM-1,75h	178
3	1 juillet, 18h00 - 19h40 BM+1,5h - BM+3h	1,6	BM+2,25h	196
4	16 octobre, 10h45 - 11h30 PM-1,5h - PM-0,75h	0,75	PM-1,0h	86
5	16 octobre, 13h00 - 14h00 PM+1,75h - PM+2,75h	1,0	PM+1,25h	118

TAB. 3.2 – Horaires et durée de chaque sortie effectuée au large du port de Yarmouth. L'heure à mi-parcours est également indiquée, en considérant l'heure de basse mer (BM) et de pleine mer (PM) comme référence pour les sorties en juillet et octobre 2015 respectivement. Le nombre de points de mesures de vitesse après la moyenne sur 30 secondes est mentionné dans la dernière colonne.



Jusant le 16 octobre 2015 (1,25h après la pleine mer)

Flot le 1^{er} juillet 2015 (2h après la basse mer)

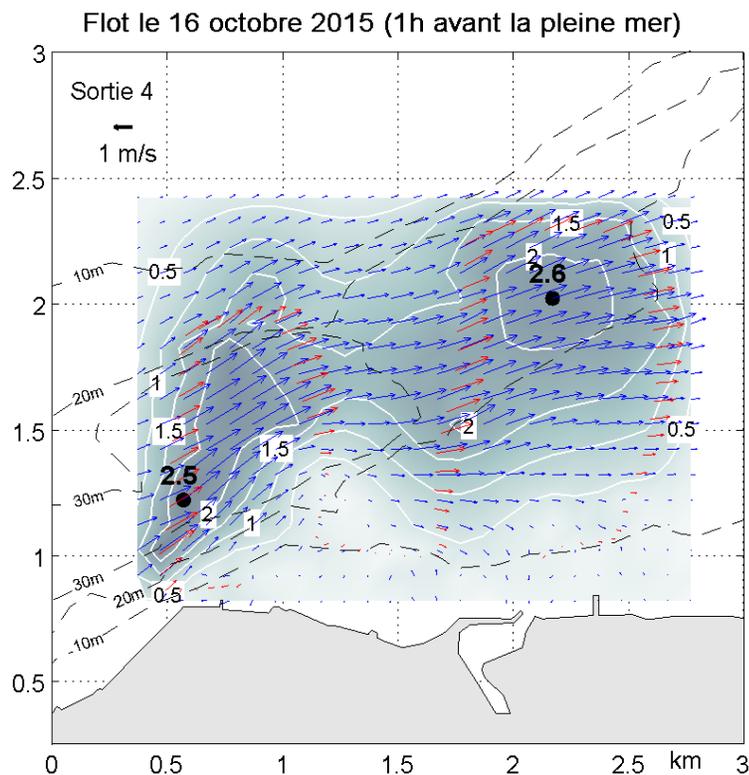


FIGURE 3.7 – Vecteurs de vitesse de courant mesurés par ADCP le long du trajet du bateau (flèches rouges), moyennés sur 30 secondes, 1 m sous la surface. Les flèches bleues représentent les vitesses obtenues par interpolation 2dVar sur un grille régulière. L’amplitude de la vitesse de courant est repérée par le dégradé de couleur gris/bleu. Les contours bathymétriques (10, 20 et 30 m) sont indiqués en pointillé. Les points noirs correspondent aux emplacement des valeurs maximales de vitesse (m/s). La croix noire tracée sur la première cartographie, indique la position où l’ADCP a été amarré à une bouée pendant une période de 70 minutes.

plus élevées sont observées au cours de la deuxième sortie, pendant le jusant (1h avant la basse mer), dans les zones les plus profondes (secteurs sud-ouest et nord-est). Chaque sortie effectuée pendant le jusant fait état de vitesses maximales atteintes dans le secteur sud-ouest alors que pendant le flot, cette zone de fort courant est plutôt localisée dans le secteur nord-est. D’autre part, les vitesses maximales de flot sont atteintes rapidement après la renverse de basse mer (sortie 3) attestant d’une étale de courant de courte durée.

Globalement, les vitesses les plus élevées sont identifiées au sein des zones où la profondeur excède 30 m mettant en évidence l'effet de la topographie et des forces de friction sur l'amplitude du courant. La propagation de l'onde de marée est fortement perturbée par la forte variabilité topographique. Celle-ci converge systématiquement vers l'isobath de 20 m. Le resserment des contours bathymétriques (de 20 et 30 m) génère une accélération locale de l'écoulement, laquelle engendre des vitesses élevées. Ce phénomène est particulièrement remarquable pendant la phase de jusant, notamment pour la première (4,5h avant la basse mer) et deuxième (1h avant la basse mer) courantographie, où la vitesse de courant atteint 2,4 m/s et 3 m/s respectivement au sud-ouest de la zone. Ici, les vitesses sont élevées quelque soit la phase de marée, néanmoins elles ne constituent pas les valeurs maximales atteintes pendant le flot. Celles-ci sont plutôt localisées dans le secteur nord-est avec une valeur de 2,9 m/s enregistrée lors de la troisième courantographie (2h après la basse mer).

3.3.4.2 Coupes transversales de la distribution de vitesse

L'utilisation d'un ADCP pour l'étude de la circulation de marée permet de mesurer la vitesse de courant à différents niveaux de profondeur. Grâce à cette spécificité, il est possible d'établir la distribution de vitesse sur la verticale, le long de chaque radiale. Un exemple est présenté sur la Fig. 3.8. Il s'agit de distributions de vitesse obtenues le 16 octobre 2015, lors de la quatrième courantographie dans la partie ouest de la zone d'étude. En dépit de ses intéressantes propriétés hydrodynamiques, la partie est a été exclue de l'analyse pour raison logistique. Située dans l'axe de la voie de navigation empruntée par les ferrys pour relier Yarmouth à Lymington, cette zone ne peut pas être sélectionnée comme site d'installation de récupérateur d'énergie tidale.

La distribution de vitesse présentée sur la Fig. 3.8 est révélatrice des coupes transversales obtenues lors des quatre autres courantographies. Dans chaque cas, la distribution de vitesse est très inhomogène, aussi bien dans le plan vertical qu'horizontal. Cette forte variabilité est une conséquence de la topographie très variable de la zone et de l'effet de

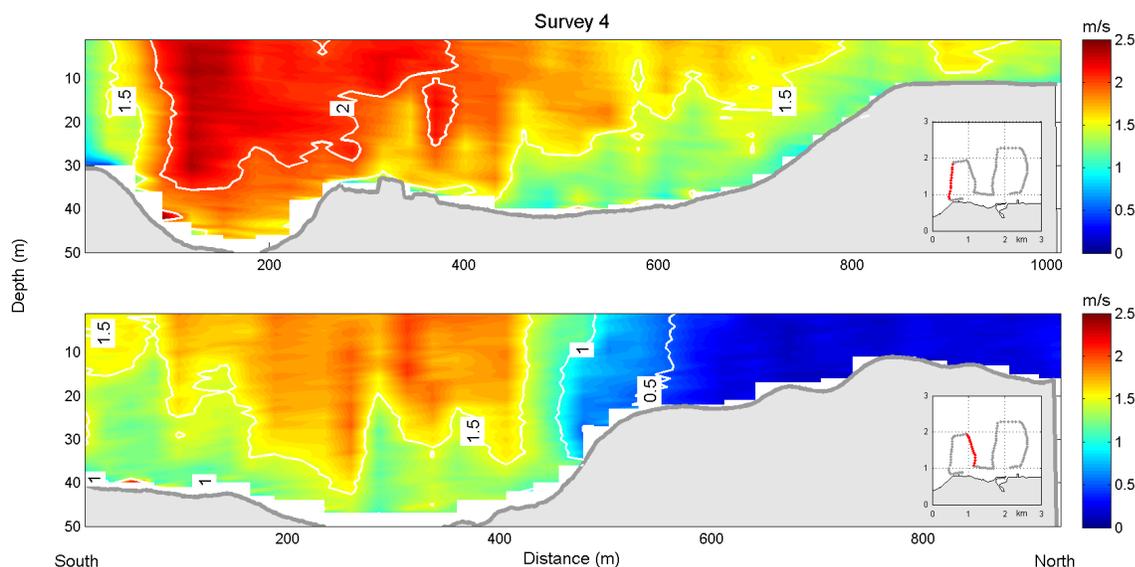


FIGURE 3.8 – Distribution spatiale de la vitesse de courant le long de coupes transversales réalisées en octobre 2015 (sortie 4). Les radiales correspondantes sont indiquées en rouge sur la fenêtre en bas à droite.

frottement sur le fond.

3.3.4.3 Profils verticaux de vitesse

Le système Koursk a été amarré à une bouée pendant une période de 70 minutes, entre la première et deuxième courantographie, le 1^{er} juillet 2015 (rectangle rouge sur la Fig. 3.6). Le site d'installation se situait à proximité du port du Yarmouth, près du rivage (voir Fig. 3.7 pour l'emplacement). La profondeur au point d'amarrage était de 7 m. Les données ont été enregistrées par un ADCP de 1 200 kHz avec une fréquence d'acquisition de 1 Hz, fournissant des mesures de vitesse tous les 0,5 m, de 1 m sous la surface, jusqu'au fond. Les conditions météorologiques étaient excellentes, avec un vent très faible et quasiment aucunes vagues. L'objectif de cette manipulation de courte durée était de tester l'efficacité du système Koursk en position statique pour l'étude des profils verticaux de vitesse. En fonction des résultats de cette étude, le déploiement de ce système sur le même site d'amarrage était envisagé au cours d'un cycle de marée complet (environ 15 jours).

Les profils verticaux, moyennés sur une minute, sont présentés sur la Fig. 3.9. La forme des profils obtenus est très particulière avec une évolution de la vitesse quasiment homogène dans les trois premiers mètres sous la surface, suivie d'une forte diminution de l'amplitude de courant.

3.3.5 Recommandations

Cette rapide étude de la circulation de marée menée au large du port de Yarmouth suggère qu'un déploiement dans le secteur sud-ouest de la zone est le plus approprié pour l'installation d'un ou plusieurs récupérateurs d'énergie tidale. Dans ce secteur, la profondeur varie entre 25 et 30 m. Par ailleurs, des vitesses supérieures à 1,5 m/s y ont été observées

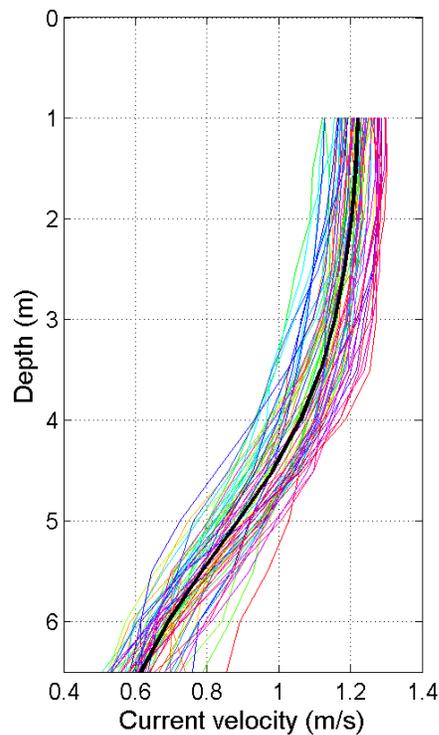


FIGURE 3.9 – Profils verticaux de vitesse obtenus lors du déploiement de l'ADCP (système Kursk) en position statique, pendant 70 minutes. Chaque profil a été moyenné sur une minute. Le profil noir représente l'évolution moyenne sur toute la période, de la vitesse sur la verticale.

pendant les phases de flot et de jusant, avec une valeur maximale de 3 m/s.

En guise de perspective, l'étude sur la variabilité temporelle des propriétés de l'écoulement (asymétrie des vitesses de courant, asymétrie de direction) qui règne dans cette zone, est vivement conseillée. L'installation d'un ADCP en position fixe au cours d'un cycle de marée complet permettrait d'évaluer cette variabilité et d'offrir ainsi une étude détaillée du potentiel hydrocinétique de la zone.

3.4 Étude de la circulation de marée au large du port de Douvres

3.4.1 Contexte de l'étude

Motivé par une politique de minimisation des impacts environnementaux et de limitation des émissions de gaz à effet de serre, le port de Douvres s'est engagé à fournir un service portuaire durable. Avec un objectif de réduction de 30 % des émissions, les autorités portuaires (« Dover Harbour Board » abrégé DHB dans la suite du texte) ont élevé au rang de priorité la création d'un réseau électrique d'origine renouvelable. Situé dans une mer à marée, le port de Douvres est susceptible d'abriter un potentiel énergétique d'origine tidale important. Parmi les objectifs fixés par DHB, figure entre autres, le développement d'un parc hydrolien de faible capacité (0,99 MW) entièrement sous sa juridiction.

Dans la cadre du projet Pro-Tide, les autorités portuaires ont sollicité le bureau d'étude « DHI Group » afin de mener des études sur la circulation du courant de marée à proximité du port de Douvres. L'objectif était de localiser le meilleur site d'implantation d'un réseau d'hydroliennes. À l'aide d'un modèle 2D, DHI a mis en évidence l'existence d'une zone de 0,45 km² comme étant susceptible d'accueillir des récupérateurs d'énergie tidale. Dans cette zone, la profondeur varie de 12 à 17 m. Le modèle a révélé des vitesses de flot et de jusant y atteignant respectivement 1,8 m/s et 1,3 m/s, en condition de marée moyenne (Fig. 3.10).

Afin de valider les résultats du modèle, le LOG a été mis à contribution pour mener des mesures de vitesse de courant au large du port de Douvres.

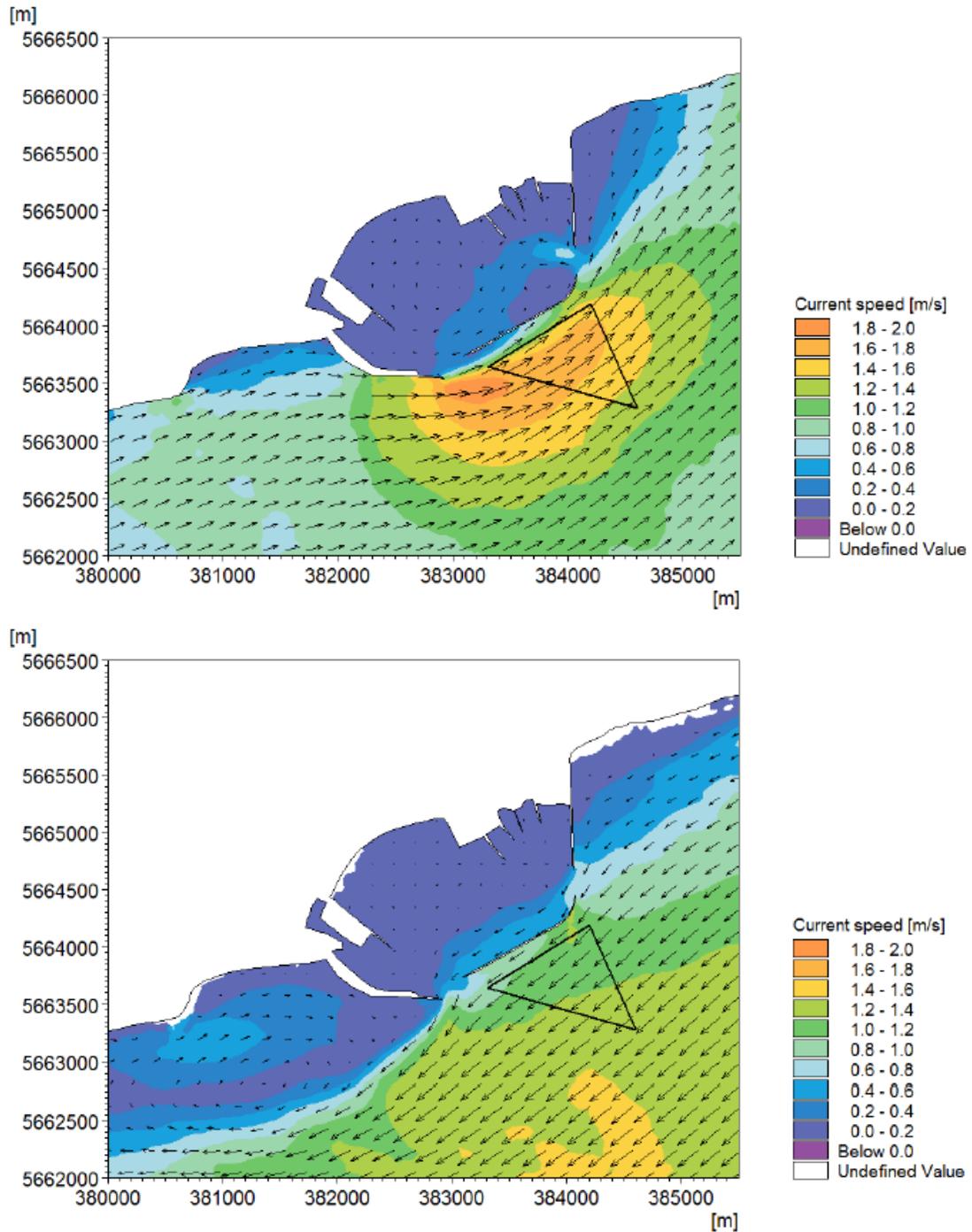


FIGURE 3.10 – Modélisation de la vitesse de courant de flot (haut) et de jusant (bas) en condition de marée moyenne. Le code couleur indique l'amplitude de courant. Les flèches révèlent la direction du courant. Le triangle noir représente la zone identifiée comme étant propice à l'installation du parc hydrolien de capacité 0,99 MW. Extrait de [DHI, 2015](#).

3.4.1.1 Site d'étude

Le port trans-Manche de Douvres (Fig. 3.11) est situé au sud-est de l'Angleterre. Distant de seulement 34 km, il est le port anglais le plus proche de la France et l'un des ports européens de passagers les plus importants. Le port est divisé en deux sections éloignées d'environ 1 km l'une de l'autre : les quais orientaux et les quais occidentaux (Fig. 3.12). Les premiers abritent les services de ferry reliant Douvres à Calais et Dunkerque ainsi que le terminal de marchandise. Les seconds sont formés par le bras ouest du port, la jetée de l'Amiralty, et les installations portuaires. Le marnage moyen et maximal aux alentours du port est de 4 m et 7 m respectivement. Enfin, l'amplitude de courant en période de vive-eau y atteint 2,5 m/s pendant le flot.

3.4.1.2 Cadre expérimental

Le système Kursk doté d'un ADCP de 1 200 kHz a été déployé au large du port de Douvres, au cours de trois journées : le 5 juillet 2013, et les 1^{er} et 2 septembre 2014 (Fig.



FIGURE 3.11 – Photographie du port de Douvres. Source : www.doverport.co.uk

3.13). Une zone de 3,5 km² a été investiguée par quatre radiales successives, espacées de 500 m. Durant l'été 2013, deux courantographies d'une durée d'une heure ont été effectuées sous des conditions de marée moyenne. La première sortie s'est déroulée 3,5 heures avant la basse mer et la seconde, 1 heure avant la basse mer. En septembre 2014, trois courantographies d'une durée d'une à deux heures ont été réalisées en conditions de morte-eau. La table des marées pour les trois jours de campagnes de mesures est présentée sur le Tab. 3.3. Pour plus de lisibilité, chaque période couverte par les mesures est représentée par un rectangle

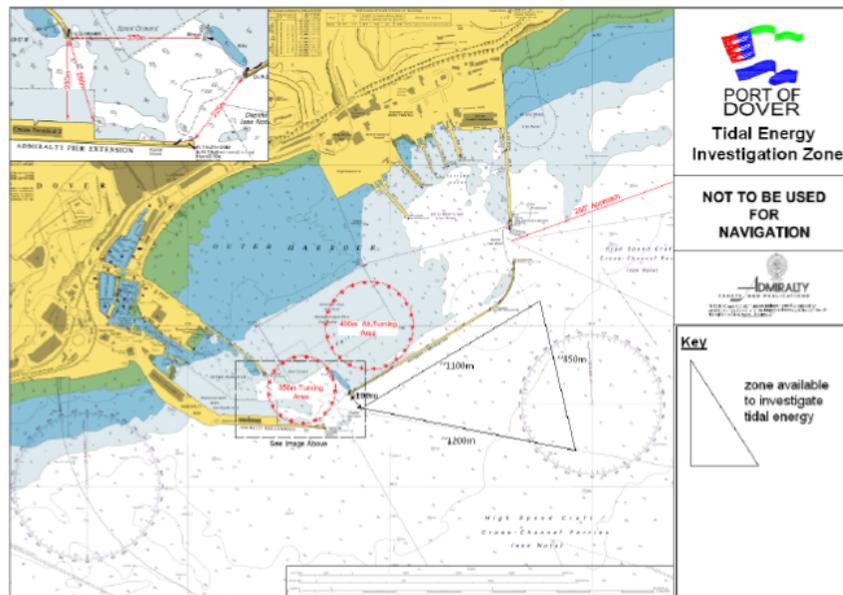


FIGURE 3.12 – Port de Douvres avec la position de la zone de 0,45 km² (triangle noir) favorable à l'installation des récupérateurs d'énergie tidale. Source : www.doverport.co.uk

Date	1 ^{ère} marée	2 ^{ème} marée	3 ^{ème} marée	4 ^{ème} marée	Coeff.
5 juillet 2013	04h55	10h10	17h25	22h30	63
	BM (1,7 m)	PM (5,8 m)	BM (1,7 m)	PM (6,0 m)	
1 ^{er} septembre 2014	03h09	10h39	15h34	23h02	53
	PM (6,3 m)	BM (1,6 m)	PM (6,3 m)	BM (1,6 m)	
2 septembre 2014	03h56	11h22	16h26	23h51	47
	PM (6,0 m)	BM (1,8 m)	PM (5,9 m)	BM (1,9 m)	

TAB. 3.3 – Heure de marée de basse mer (BM) et de pleine mer (PM) lors des trois jours de manipulation au large du port de Douvres. Le coefficient de marée pour chaque jour est également indiqué.



FIGURE 3.13 – Déploiement du système Koursk au large du port de Douvres.

gris sur la Fig. 3.14.

Après la récupération des données, les vitesses ont été moyennées sur 20-30 secondes, géolocalisées et interpolées par la méthode 2dVar, sur une grille régulière de 50 m de résolution. Ainsi, des cartes du champ de vitesse ont pu être générées à différents niveaux de profondeur.

Les horaires de sorties (UTC +1), la durée et l'heure à mi-parcours de chaque campagne sont reportées dans le Tab. 3.4.

3.4.2 Résultats

3.4.2.1 Cartographies des vecteurs courant, interpolation du champ de vitesse

Les flèches rouges sur la Fig. 3.15 montrent les vecteurs vitesses du courant de surface (1 m de profondeur) moyennés temporellement pour chaque courantographie menée au large du port de Douvres. Dans la majorité du domaine, la direction des vecteurs courant est régit par la bathymétrie. Pendant le flot, une vitesse de courant supérieure à 1,5 m/s est observée à environ 300 m au large de la digue centrale (sortie 3, 2,5h après la basse mer)

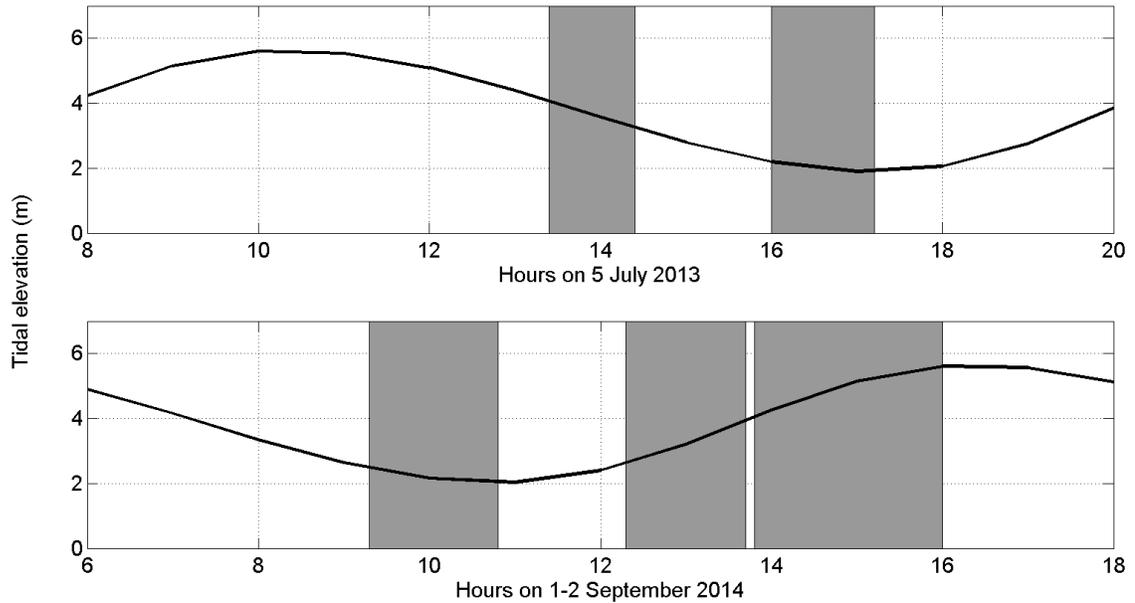


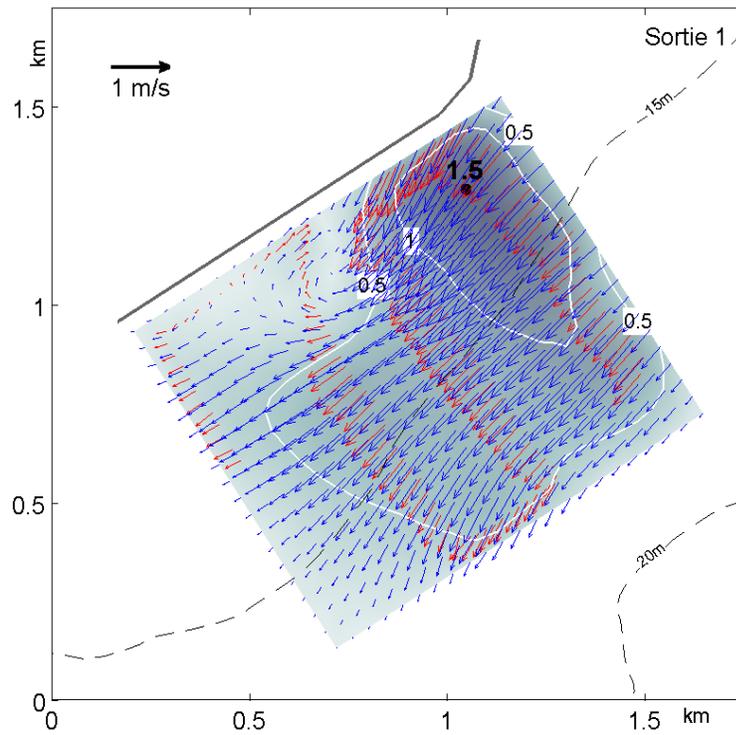
FIGURE 3.14 – Élévation du niveau de la mer simulée par le SHOM dans le port de Douvres. Les rectangles gris indiquent les périodes au cours desquelles les différentes courantographies ont été réalisées au large du port de Douvres.

avec une vitesse maximale de 2 m/s. Au large de la digue ouest, la vitesse maximale est

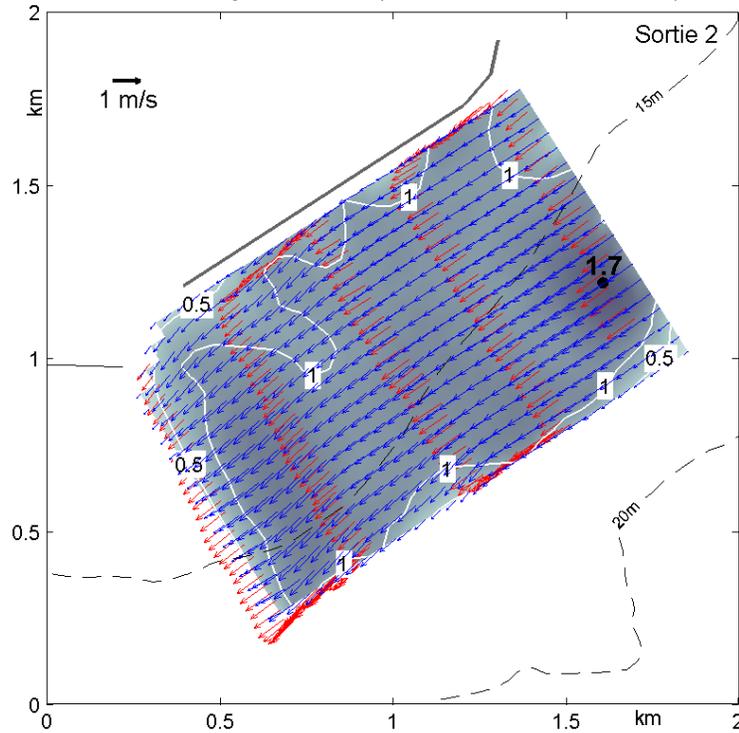
Sortie	Horaires de sorties (UTC+1)	Durée (h)	Heure à mi-parcours	Nb. de pts de mesure de vitesse
1	5 juillet, 13h25 - 14h25 BM-4h - BM-3h	1,0	BM-3,5h	139
2	5 juillet, 16h00 - 17h15 BM-1,5h - BM-0,25h	1,25	BM-0,9h	231
3	1 sep., 13h40 - 16h00 BM+1,25h - BM+3,5h	2,25	BM+2,5h	281
4	2 sep., 09h20 - 10h45 BM-3h - BM-1,5h	1,6	BM-2,25h	166
5	2 sep., 12h20 - 13h45 BM - BM+1,5h	1,6	BM+0,75h	170

TAB. 3.4 – Horaires et durée de chaque sortie effectuée au large du port de Douvres. L'heure à mi-parcours est également indiquée, en considérant l'heure de basse mer comme référence. Le nombre de points de mesures de vitesse après la moyenne sur 30 secondes est mentionné dans la dernière colonne.

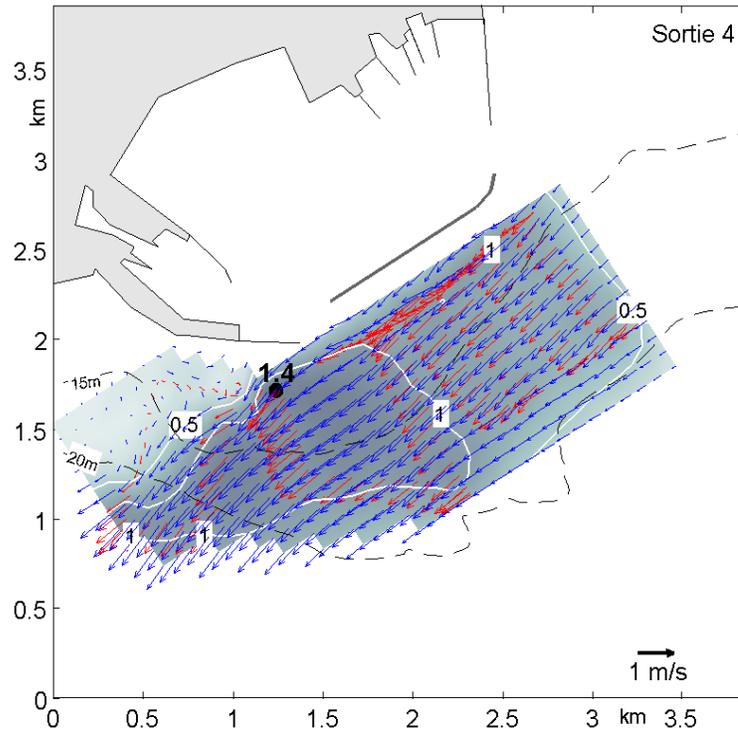
Jusant le 5 juillet 2013 (3,5h avant la basse mer)



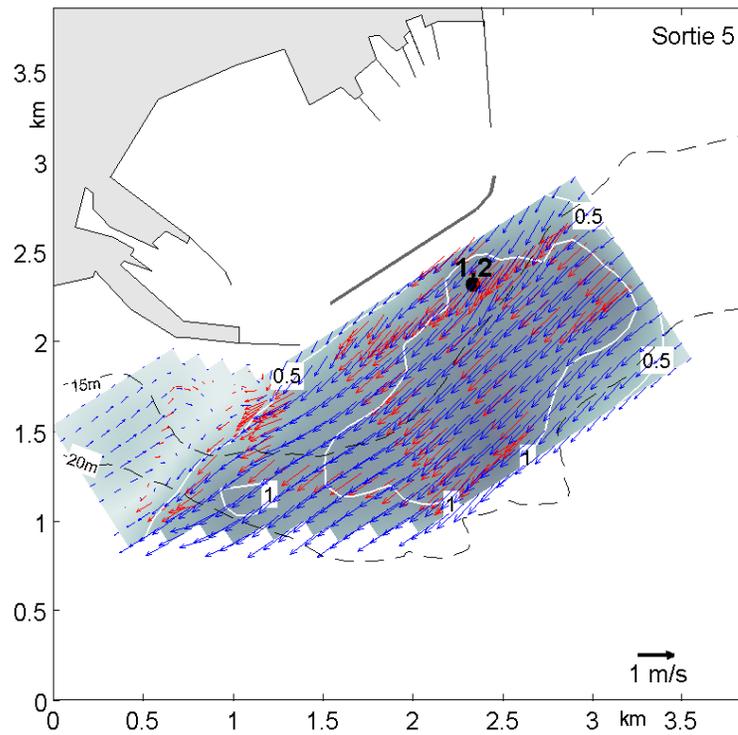
Jusant le 5 juillet 2013 (0,9h avant la basse mer)



Jusant le 2 septembre 2014 (2,25h avant la basse mer)



Jusant le 2 septembre 2014 (0,75h avant la basse mer)



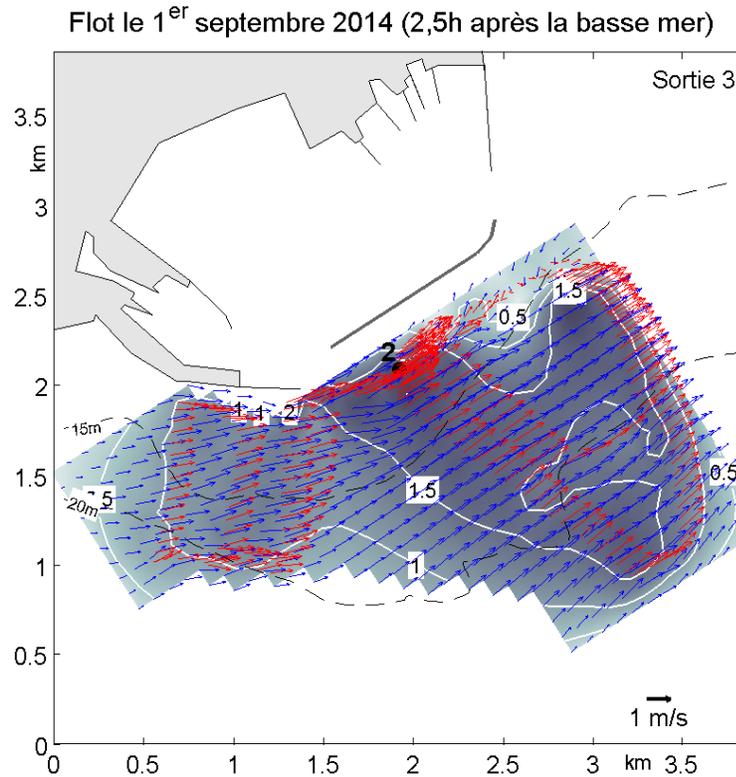


FIGURE 3.15 – Vecteurs de vitesse de courant mesurés par ADCP le long du trajet du bateau (flèches rouges), moyennés sur 30 secondes, 1 m sous la surface. Les flèches bleues représentent les vitesses obtenues par interpolation 2dVar sur un grille régulière. L’amplitude de la vitesse de courant est repérée par le dégradé de couleur gris/bleu. Les contours bathymétriques (15 et 20 m) sont indiqués en pointillé.

légèrement supérieure à 1 m/s.

La phase de jusant a été largement investiguée, les différentes courantographies effectuées, ont permis de couvrir une période allant de 4h (sortie 1) avant la basse mer à 1,5h après la basse mer (sortie 5). Au cours de ces deux périodes de marée, les vitesses maximales de 1,4 - 1,5 m/s sont observées dans la partie centrale avec un écoulement se propageant du nord-est vers le sud-ouest en suivant les contours bathymétriques. La vitesse maximale atteinte pendant le jusant (1,7 m/s) est observée environ 1h avant la basse mer à l’extrémité est de la zone d’étude. Globalement, les vitesses observées pendant le jusant sont plus faibles

que celles mesurées pendant le flot. Ceci suggère l'existence d'une asymétrie des vitesses de courant.

La première courantographie (3,5h avant la basse mer), a permis de mettre en évidence la présence d'un tourbillon transitoire de polarisation négative à proximité de la digue centrale. L'interaction de l'onde de marée en provenance du nord-est avec la digue centrale engendre cette vorticité peu de temps après la renverse de courant de basse-mer. Ce tourbillon, advect   vers l'ouest semble fusionner avec un autre tourbillon de polarisation négative situé au sud de la digue ouest (sorties 4 et 5). Celui-ci subsiste durant toute la période de jusant et disparaît pendant l'étale de basse mer. Pendant le flot, le phénomène inverse se produit. Un tourbillon de polarisation négative est généré près de l'entr  e sud du port et est advect   vers la direction nord-est.

   l'exception des mesures effectu  es lors de la deuxième courantographie, les vitesses maximales apparaissent systématiquement au sud de la digue centrale. La diminution de

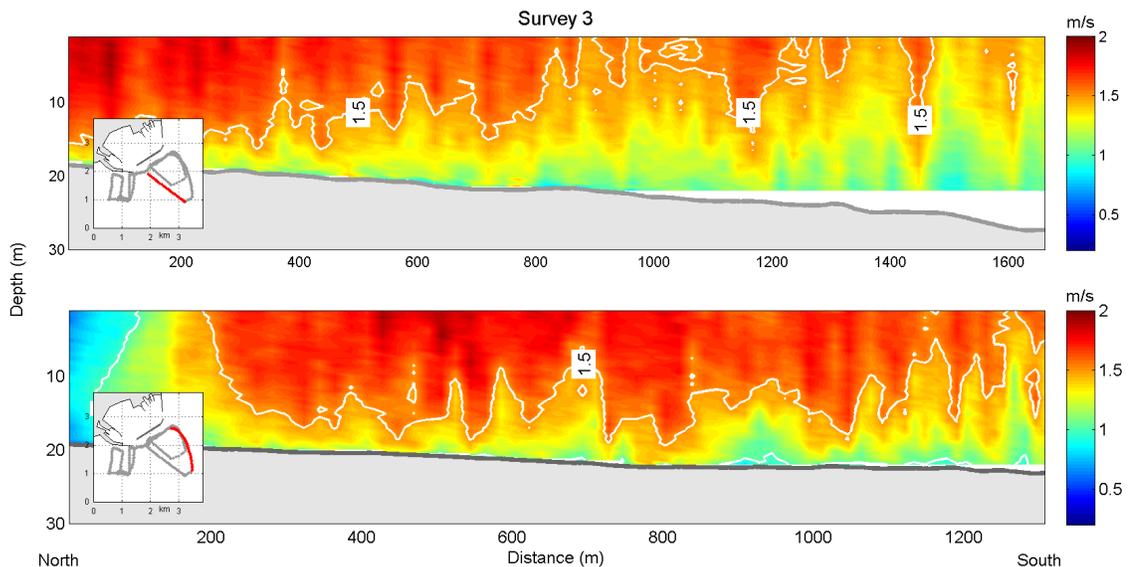


FIGURE 3.16 – Distribution spatiale de la vitesse de courant le long de coupes transversales r  alis  es en septembre 2014 (sortie 3). Les radiales correspondantes sont indiqu  es en rouge sur la fenêtre en bas à gauche.

la profondeur, entraîne une accélération locale de l'écoulement par effet Bernoulli, générant ainsi des vitesses élevées. D'autre part, la dynamique tourbillonnaire semble perturber la distribution des vitesses au voisinage de la digue, en particulier à l'amorce de la phase de jusant.

3.4.2.2 Coupes transversales de la distribution de vitesse

La Fig. 3.16 montre la distribution spatiale de la vitesse de courant le long de coupes transversales (radiales) réalisées lors de la troisième courantographie, en septembre 2014. Seule la zone au sud de la digue centrale a été considérée pour cette étude. Chaque coupe transversale fait état de variation de la vitesse dans le plan horizontal et vertical, résultant de la topographie variable et de l'effet de frottement sur le fond. Les vitesses les plus élevées sont observées pour la radiale effectuée à l'extrémité est de la zone, à 500 m de la digue centrale.

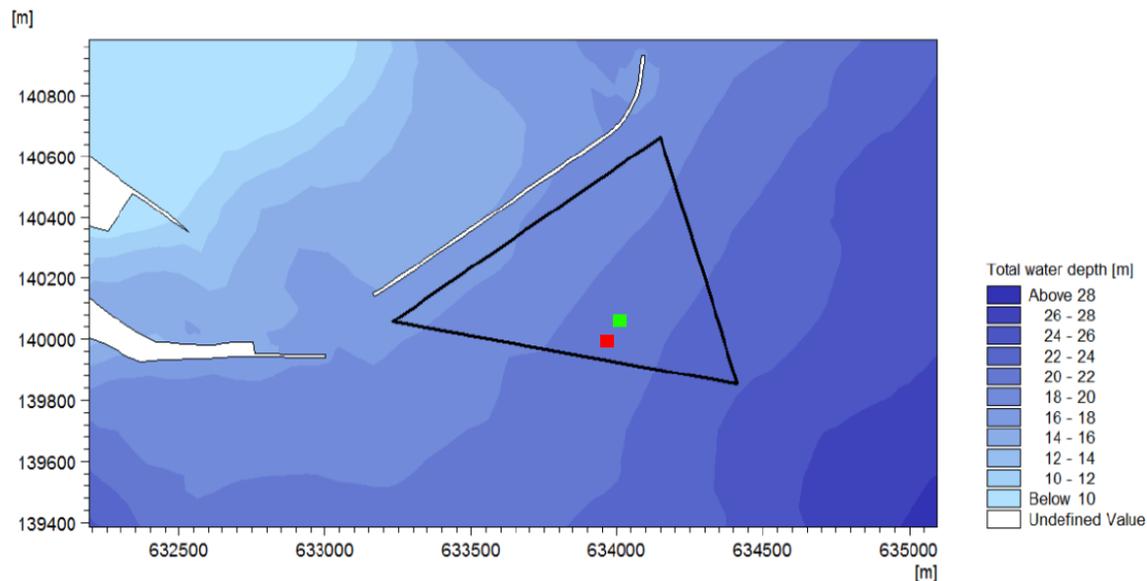


FIGURE 3.17 – Emplacement du point où la vitesse moyenne mesurée (carré vert) et simulée (carré rouge) est la plus élevée. Extrait de [DHI, 2015](#).

3.5 Analyse et recommandations

Les différentes courantographies menées au large du port de Douvres ont mis en évidence des amplitudes de courant relativement faibles. Globalement, les vitesses enregistrées pendant le flot et le jusant au sud de la digue centrale sont de l'ordre de 1,9 m/s et 1,2 m/s respectivement. Ces valeurs sont en accord avec celles obtenues lors de l'étude numérique menée par DHI (1,8 m/s et 1,3 m/s).

En effectuant la moyenne des mesures de courant réalisées au cours des cinq courantographies, nous avons localisé l'endroit où la vitesse de courant est la plus élevée. Celle-ci atteint 1,35 m/s à environ 300 m de la digue centrale (carré vert sur la Fig. 3.17). Géographiquement, cette zone est très proche de celle identifiée par DHI (carré rouge sur la Fig. 3.17). Ceci démontre une nouvelle fois la concordance des résultats obtenus par le modèle et les mesures de courant.

Néanmoins, la variabilité temporelle de l'écoulement établie par le modèle doit encore être validée. Pour cela, nous préconisons l'installation d'un ADCP en position fixe au cours d'un cycle de marée complet, là où les vitesses sont les plus élevées.

3.6 Conclusions

En réponse aux nombreux accords internationaux établis à la fin des années 2000, le Royaume-Uni s'est fixé d'ambitieux objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre avec notamment une réduction de 80% des émissions de CO₂ à l'horizon 2050. Pour atteindre ces objectifs, le gouvernement a publié, en 2009, un Livre blanc : *The UK Low Carbon Transition Plan*, détaillant une feuille de route jusqu'en 2020 et dans lequel il affiche sa volonté de s'engager dans « une transition vers une économie sobre en carbone ». Un vaste programme de développement des énergies renouvelables y est notamment mentionné afin de tirer profit du potentiel considérable du pays en matière d'énergie renouvelable en

particulier éolien et hydrolien (Strachan et Lal, 2004, Jay, 2010).

Afin de s'assurer une croissance durable pour les prochaines décennies, le gouvernement encourage les différents comtés britanniques à explorer de nouvelles sources énergétiques parmi lesquelles figure l'énergie des courants de marée. En tant que partenaire du projet européen Pro-Tide, les autorités régionales de l'île de Wight et du port de Douvres ont affiché leurs ambitions quant au développement de ce type d'énergie.

À travers ce projet, des bureaux d'études ont été sollicités afin d'étudier la faisabilité technique et économique de l'implantation d'un parc hydrolien d'une capacité totale installée de 30 MW à proximité de l'île de Wight et de 0,99 MW dans la zone sous la juridiction du port de Douvres.

Une zone de 2,5 km², sur le site de Perpetuus (sud de l'île de Wight) a été identifiée comme étant propice à l'installation d'un réseau d'hydroliennes. La couronne britannique (« The Crown Estate ») a d'ailleurs affichée son soutien à ce projet en accordant un prêt, remboursable sur 25 ans, au Centre d'Energie Tidale de Perpetuus (PTEC), afin de mener à bien ce projet. Celui-ci contribuera à atteindre l'objectif d'indépendance énergétique, fixé par les autorités de l'île de Wight à l'horizon 2025. Le début des travaux d'installation du parc hydrolien est espéré début 2019. Avant cela, PTEC envisage de déployer des systèmes radars afin de confronter les résultats du modèle numérique à des mesures de vitesse de courant.

Bien que ce site ait été identifié comme étant le plus énergétique, les différents modèles numériques ont également révélé une zone de fort courant, au nord-ouest de l'île, notamment au large du port de Yarmouth. En réponse aux sollicitations des autorités de l'île de Wight, nous avons investigué une zone de 3,5 km² au large de ce port, au moyen d'un ADCP tracté. L'interpolation variationnelle de mesures des vitesses de courant, effectuées au cours de différents stades de marée, a permis de reconstituer le champ de vitesse pour chaque courantographie. Les vitesses maximales ont été observées dans le secteur sud-ouest avec une valeur maximale de 3 m/s atteinte pendant le jusant, 1 heure avant la basse mer

(Fig. 3.7). Compte tenu des vitesses élevées enregistrées dans ce secteur, et la profondeur du site ($\simeq 30$ m), nous avons estimé qu'il pourrait être favorable à l'implantation de systèmes de récupérations d'énergie tidale.

Même si une zone propice à l'exploitation des courants de marée a pu être identifiée, cette étude n'en demeure pas moins insuffisante pour la caractérisation du potentiel hydrocinétique. Elle constitue en réalité la première étape dans l'estimation du potentiel. Le recours à un modèle numérique peut être envisagé comme l'étape ultérieure. Les mesures ADCP trouveront une application dans la validation des résultats du modèle et permettront d'en améliorer les performances. L'emploi d'un modèle permettra de déterminer avec précision l'emplacement du site idéal à l'implantation d'hydrolienne(s). Les résultats pourront être étayer par le déploiement, sur le site sélectionné, d'un ADCP fixe, installé sur le fond. Cette étape finale permettra de déterminer les paramètres pertinents de quantification d'énergie et d'en évaluer les variations temporelles. Elle fournira également une évaluation plus approfondie visant à confirmer si la puissance électrique réellement disponible est d'une ampleur suffisante pour fournir un avantage économique à l'île de Wight.

Le second site discuté dans ce chapitre concerne une zone située à proximité du port de Douvres. Initialement, l'étude de la circulation du courant de marée au large de ce port a été confiée au bureau d'étude DHI. À l'aide d'un modèle numérique, des vitesses de 1,8 m/s et 1,3 m/s ont été identifiées en phase de flot et de jusant respectivement (en conditions de marée moyenne), au sud de la digue centrale. Notre objectif était de confronter les résultats du modèle à des mesures de courant effectuées par ADCP tracté. Nos résultats montrent que les vitesses mesurées sont très proches de celles obtenues par la modélisation. L'écart relatif entre les vitesses observées et modélisées a été estimé à 6% avec une surestimation des vitesses modélisées pendant le flot et une sous-estimation pendant le jusant.

En moyennant les mesures de courant réalisées au cours des différentes courantographies, nous avons identifié le point où la vitesse moyenne de courant est la plus élevée. La valeur maximale de 1,35 m/s est atteinte à 300 m de la digue centrale (Fig. 3.17). La

position de ce site est très proche de celle relevée par DHI. Seuls 75 m sépare les deux sites. Cette distance est inférieure à la résolution spatiale du modèle ($\simeq 100$ m). La concordance des résultats obtenus par modélisation et mesures des courants autorise un certain niveau de confiance quant à la localisation du meilleur site d'implantation d'un parc hydrolien au large du port de Douvres ainsi que de la vitesse de courant qui y règne.

Toutefois, cette vitesse ($\simeq 1,35$ m/s) atteste d'un flux d'énergie relativement faible en comparaison avec d'autres sites EMR, faisant actuellement l'objet d'étude. Cette constatation soulève des questions de viabilité économique d'un projet d'implantation d'hydrolienne(s) au large du port de Douvres. Devant ce manque de certitude, les autorités portuaires de Douvres ont décidé de suspendre leur projet de parc hydrolien, jugeant la performance de la technologie hydrolienne disponible sur le marché, encore insuffisante pour la conversion des courants de faibles intensités en électricité.

Partie II

ÉTUDE DE L'IMPACT DE LA TURBULENCE
SUR L'EFFICACITÉ DE SYSTÈMES DE RÉ-
CUPÉRATION D'ÉNERGIE TIDALE

Aspects théoriques et méthodologie expérimentale

4.1 Introduction

Après des années de tests et d'aménagements menés par les différents constructeurs, la technologie hydrolienne est aujourd'hui suffisamment mature pour envisager un développement à l'échelle commerciale. La création du premier parc hydrolien raccordé au réseau national de distribution d'électricité, implanté au large des Côtes d'Armor, confirme cette tendance.

Pour être compétitive vis-à-vis des autres formes de production d'énergie, les coûts d'installation et d'entretien des hydroliennes doivent être amortis sur une durée d'au moins 20 ans (Lloyd, 2005, Wolfram, 2006), laquelle correspond à leur durée de vie. Cependant, les conditions hostiles du milieu d'implantation des hydroliennes mettent à mal la longévité des machines et constituent un sérieux obstacle à la viabilité économique des projets de récupération d'énergie des courants de marée.

À l'heure actuelle, de nombreuses défaillances dans la conception d'hydroliennes (manque de robustesse de la machine, rendement très faible) ont été répertoriées, en particulier pour les dispositifs de première génération. La plupart de ces échecs ont pour origine une sous-

estimation des contraintes hydrodynamiques qui s'appliquent sur la structure des hydroliennes, notamment sur les pales (Liu et Veitch, 2012) et d'une méconnaissance des phénomènes turbulents qui règnent dans leur milieu de fonctionnement (environnement côtier, milieu estuarien). Afin de prédire ces phénomènes encore mal appréhendés, les industriels s'appuient sur des lignes directives très approximatives pour la conception de leurs turbines hydrauliques (Lloyd, 2005). Ces directives intègrent des modèles et des théories empiriques conçus principalement pour le domaine éolien et pas toujours adaptés à la technologie hydrolienne. Afin de compenser le manque de connaissance et d'atténuer l'échec potentiel, les concepteurs de turbines ont profité du développement des matériaux composites pour renforcer la résistance de leurs dispositifs aux phénomènes hydrodynamiques et turbulents, engendrant des coûts de production encore plus élevés (Marsh, 2009, Zhou et al., 2013).

Pour affiner la prédiction de la turbulence et des contraintes hydrodynamiques, prévenir les défaillances et ainsi améliorer la rentabilité des récupérateurs d'énergie tidale, le milieu industriel fait face à de nombreuses problématiques. L'impact de la turbulence sur l'intégrité physique et la performance des hydroliennes en est une. Cette problématique a été abordée à plusieurs reprises au cours de tests de prototypes d'hydroliennes en bassin d'essais (e.g. Maganga et al., 2010, Mycek et al., 2014, Durán Medina et al., 2017). Cependant l'absence de ce type d'étude en milieu naturel manque cruellement. Les difficultés techniques inhérentes à la quantification des phénomènes turbulents dans ce type d'environnement explique en partie cette lacune.

Afin d'assurer la viabilité économique d'un projet de récupération d'énergie tidale, il est de l'intérêt des industriels d'élaborer des stratégies pertinentes et efficaces visant à estimer les paramètres turbulents de l'écoulement. Celles-ci doivent permettre, d'une part, d'établir les ordres de grandeurs des phénomènes turbulents, d'autre part, de déterminer l'échelle caractéristique de la turbulence (que l'on peut identifier à une taille moyenne des tourbillons).

Dans le cadre du projet Pro-Tide, une étude d'impact de la turbulence sur l'efficacité

de fonctionnement de deux prototypes d'hydroliennes a été menée dans l'Escaut, en Belgique. Cette étude fait l'objet de la seconde partie de ce manuscrit et se décompose en deux chapitres. Nous présentons dans le premier chapitre, la méthodologie et les aspects théoriques employés pour cette étude. Dans le second, nous révélons et discutons les résultats obtenus lors des campagnes de mesures effectuées sur le site de tests des hydroliennes.

La première section du présent chapitre introduit les principaux concepts inhérents à la description du mouvement turbulent d'un fluide. En particulier, les aspects théoriques de la turbulence développée sont abordés. S'ajoute à cela, un bref historique relatant les résultats d'études expérimentales sur les paramètres turbulents et leurs ordres de grandeurs en milieu marin. La seconde section de ce chapitre présente les deux technologies testées ainsi que la méthodologie employée pour cette étude.

4.2 La turbulence développée

4.2.1 Aspects théoriques

4.2.1.1 Régime laminaire et turbulent

En mécanique des fluides, deux types de régimes sont utilisés pour caractériser l'écoulement d'un fluide : le régime laminaire et le régime turbulent. En écoulement laminaire, les trajectoires du fluide sont rectilignes et le mouvement se décompose en couches de fluide parallèles, glissant les unes par rapport aux autres. Lorsque la vitesse du fluide dépasse un certain seuil, la permanence et la régularité de l'écoulement cessent. Les particules du fluides suivent des trajectoires enchevêtrées générant des mouvements irréguliers et tourbillonnants : l'écoulement devient turbulent. En 1883, Osborne Reynolds identifie pour la première fois la transition d'un écoulement laminaire vers un écoulement turbulent à l'aide d'un dispositif expérimental (Fig. 4.1). Il mit en évidence cette transition en introduisant dans l'écoulement, à l'intérieur d'un tube de verre, un filet de fluide coloré. Il constata qu'à

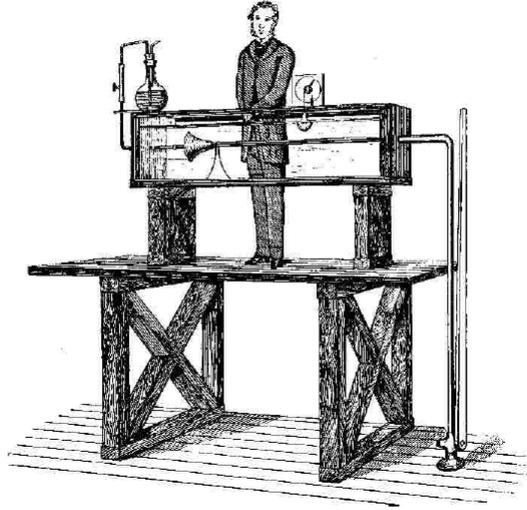


FIGURE 4.1 – Gravure de l’expérience d’Osborne Reynolds (Reynolds, 1883).

partir d’une certaine vitesse, le filet se trouble et se perd dans le liquide extérieur (Fig. 4.2).

4.2.1.2 Les contraintes turbulentes ou contraintes de Reynolds

En régime turbulent, la vitesse (tridimensionnelle) du fluide en un point donné de l’espace subit des fluctuations temporelles rapides et sans période définie (Fig. 4.3). On est ainsi amené à considérer chaque composante de la vitesse $u_i(\vec{x}, t)$, au point \vec{x} à l’instant t , comme la résultante d’une vitesse moyenne $\bar{u}_i(\vec{x}, t)$ variant lentement en fonction de \vec{x} et de t , et d’une vitesse d’agitation $u'_i(\vec{x}, t) \simeq u_i(\vec{x}, t) - \bar{u}_i(\vec{x}, t)$ variant très rapidement en fonction de \vec{x} et de t .

En théorie, la vitesse moyenne est définie comme la moyenne statistique sur des réalisations indépendantes de l’écoulement. En pratique, cette estimation est difficile à mettre en oeuvre. Dans le cas d’un écoulement turbulent (statistiquement) stationnaire, on invoque une propriété d’ergodicité pour assimiler la moyenne d’ensemble à une moyenne temporelle (Novikov, 1990) :

$$\bar{u}_i(\vec{x}) \simeq \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} u_i(\vec{x}, t) dt \quad (4.1)$$

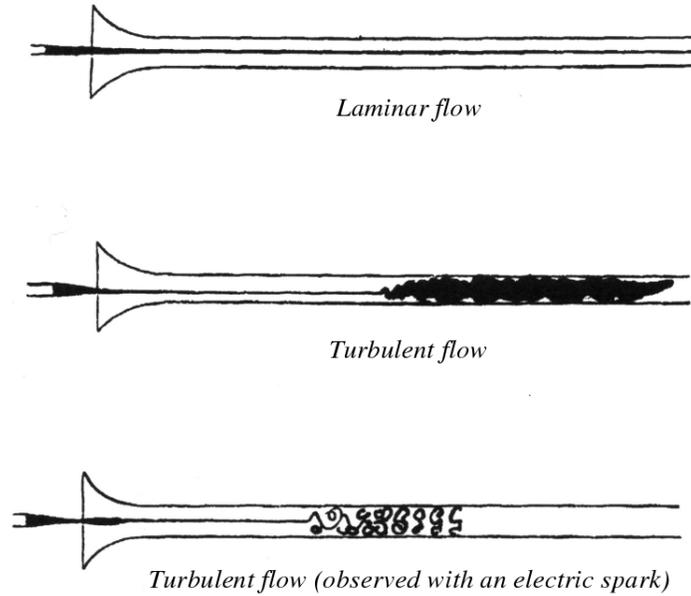


FIGURE 4.2 – Observations de Reynolds sur les types d’écoulement obtenus lors de ces expériences (Reynolds, 1883).

en choisissant l’intervalle de temps T très grand devant les périodes temporelles de la vitesse turbulente.

Les équations qui régissent le mouvement d’une fluide visqueux (Newtonien) ont été introduite au début du XIX^{ième} siècle. Connues sous le nom d’équations de *Navier-Stokes*, elles sont en faite un formulation locale du principe fondamental de la dynamique énonçant la conservation de la quantité de mouvement. L’équation principale s’écrit comme :

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \Delta \mathbf{u} \quad (4.2)$$

où \mathbf{u} est la vitesse du fluide et ν , la viscosité cinématique. Le champ de pression est déterminé à chaque instant par la condition d’incompressibilité (ρ constant) :

$$\operatorname{div} \mathbf{u} = 0 \quad (4.3)$$

Cette condition est également satisfaite pour la vitesse moyenne $\bar{\mathbf{u}}$ et la vitesse d'agitation \mathbf{u}' .

Une caractéristique importante d'un écoulement visqueux est son nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{|(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u}|}{|\nu \Delta \mathbf{u}|} = \frac{\mathbf{u}/L}{\nu/L^2} = \frac{u_L \cdot L}{\nu} \quad (4.4)$$

u_L et L étant respectivement la vitesse et la longueur caractéristique de l'écoulement. Le nombre de Reynolds mesure l'importance relative des effets inertiels $(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u}$ sur les effets visqueux $\nu \Delta \mathbf{u}$.

À la fin du siècle dernier, Reynolds proposa de décomposer les moyennes d'ensemble des champs turbulents, c'est-à-dire les moyennes effectuées à partir d'un grand nombre N de réalisations d'un même écoulement, en une partie moyenne $\langle u \rangle$, correspondant à la valeur moyenne de la distribution, et une partie fluctuante u' , dont la valeur est caractérisée par l'écart-type de vitesse σ_u .

La connaissance de $\langle u \rangle$ et σ_u permet notamment de quantifier un paramètre utile

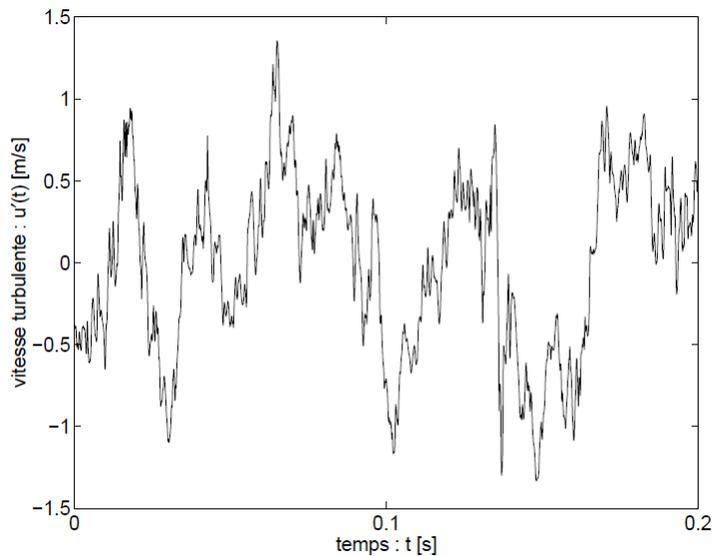


FIGURE 4.3 – Fluctuations temporelles de vitesse turbulente en un point donné de l'espace mesurées dans l'air par un anémomètre à fil chaud (Benzi et al., 1995).

de la turbulence : le taux de turbulence I_u . Celui-ci rend compte de la fluctuation de vitesse par rapport à la vitesse moyenne prise localement. Dans le cadre de cette thèse, seule la composante longitudinale a été considérée pour la quantification du taux de turbulence. Dans le cas unidimensionnel, ce taux se définit dès lors par :

$$I_u = \frac{\sigma_u}{\langle u \rangle} \quad (4.5)$$

En décomposant ainsi les différents champs, Reynolds réécrivit l'équation de Navier-Stokes et aboutit à une nouvelle équation, dite de Reynolds, qui prédit l'évolution de la partie moyenne du champ de vitesse.

4.2.1.3 La cascade d'énergie de Richardson

En 1922, Lewis Richardson établit que l'agitation turbulente implique des mouvements sur un continuum d'échelles allant de la taille de l'écoulement à l'échelle de la dissipation moléculaire (Richardson, 1922). Le processus imaginé par Richardson est celui d'une cascade d'énergie résultant d'une fragmentation de l'écoulement en structures d'échelles de tailles décroissantes (Fig. 4.4). Le schéma phénoménologique s'appuie sur le point suivant : la turbulence est ramenée à un ensemble de structures fluides imbriquées, dont la taille caractéristique et la vitesse caractéristique résultent d'un processus dynamique de brisures successives des structures d'échelles en structures de plus en plus petites. Ce processus de cascade est décrit par Richardson dans sa paraphrase d'un célèbre poème de Jonathan Swift¹ :

1. « So, naturalists observe, a flea Has smaller fleas that on him prey ; and these have smaller still to bite 'em ; And so proceed ad infinitum. » - Poetry, a Rhapsody by Jonathan Swift.



*Big whorls have little whorls that feed on their velocity,
and little whorls have lesser whorls and so on to viscosity.*

Lewis Richardson

En 1941, Andreï Kolmogorov formalise ce processus en étudiant comment l'équation de Navier-Stokes en dimension trois répartit l'énergie entre les différents degrés de liberté d'un écoulement turbulent développé. Il distingue alors trois domaines d'échelles :

- **Le domaine de production de turbulence** : L'énergie du mouvement est transférée à partir des grandes structures (échelles de production) où agissent les forces extérieures.
- **Le domaine de dissipation** : L'énergie est dissipée au niveau des structures suffisamment petites pour pouvoir être éliminée par l'action du frottement visqueux.
- **Le domaine inertiel** : le transfert d'énergie entre les échelles s'effectue de façon auto-similaire, c'est-à-dire de manière identique à toutes les échelles et de façon locale. Toute l'énergie de chaque structure est transférée aux sous-structures qu'elle engendre. La viscosité n'affecte pas le processus qui est purement inertiel.

Dans la zone dite inertielle, Kolmogorov suppose que l'énergie est transférée entre les différents degrés de liberté du système, qu'il identifie aux échelles de l'écoulement. La zone inertielle ne prend en compte ni la très grande échelle (échelle d'injection L), où l'énergie est injectée dans le système par les forces extérieures, ni la très petite échelle (échelle de Kolmogorov η), où l'énergie est extraite par dissipation visqueuse. L'existence de cette zone inertielle n'est possible que dans le cas de la turbulence pleinement développée, c'est-à-dire pour les très grands nombres de Reynolds. Ce dernier peut également être vu comme le rapport entre la plus grande et la plus petite échelle de la zone inertielle.

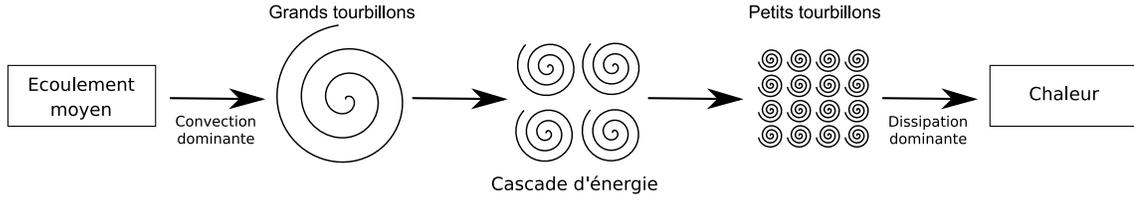


FIGURE 4.4 – Cascade d'énergie imaginée par Richardson.

En considérant une échelle ℓ telle que $L \gg \ell \gg \eta$ (η étant nettement plus grande que l'échelle du mouvement brownien), le flux d'énergie Π_ℓ dans la zone inertielle est définie par (Frish, 1995) :

$$\Pi_\ell \sim \frac{v_\ell^3}{\ell} \sim \varepsilon \quad (4.6)$$

où v_ℓ est la vitesse de l'écoulement et ε est la dissipation ou taux de transfert d'énergie. Ce paramètre indique le seuil à partir duquel l'énergie se dissipe irréversiblement sous forme de frottements ou de chaleur. La dimension de ε est :

$$[\varepsilon] = \text{W/kg} = \text{L}^2\text{T}^{-3}$$

On considère trois paramètres : l'échelle d'injection L , les fluctuations de vitesse à l'échelle ℓ , δv et la viscosité ν de dimensions respectives $[L]=\text{L}$, $[\delta v]=\text{LT}^{-1}$ et $[\nu]=\text{L}^2\text{T}^{-1}$. Par analyse dimensionnelle, on obtient une relation reliant les fluctuations moyennes de la vitesse δv à l'échelle ℓ et la dissipation ε (supposée constante) dans le domaine inertiel :

$$\delta v = \varepsilon^{1/3} \ell^{1/3} \quad (4.7)$$

Il s'agit de la relation fondamentale établie par Kolmogorov en 1941, communément appelée K41. L'approche de Kolmogorov est fondamentale car elle permet à partir d'arguments d'analyse dimensionnelle simples, de donner l'expression de ces différentes échelles dont celle de Kolmogorov :

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{1/4} \quad (4.8)$$

La même année, A.N. Obukhov, étudiant de Kolmogorov, utilise une approche similaire à K41 pour étudier le spectre d'énergie $E(k)$ du nombre d'onde k de la vitesse dans l'espace spectral de Fourier. Il établit que (Obukhov, 1941) :

$$E(k) = C\varepsilon^{2/3}k^{-5/3} \quad (4.9)$$

où $C \sim 1,5$ est la constante de Kolmogorov. Dans la zone inertielle, là où l'énergie transite, l'énergie se répartit sur toute la gamme des structures pour qu'une puissance ε puisse être dissipée en bout de chaîne. Pour un nombre d'onde donné k , la densité spectrale d'énergie est donc uniquement liée à la dissipation et au nombre d'onde. Cette loi a été vérifiée expérimentalement dans le domaine atmosphérique (Gurvitch, 1960) et océanographique (Grant et al., 1962).

En considérant l'hypothèse de Taylor (écoulement statistiquement stationnaire), également connue sous l'appellation de turbulence gelée, il est possible de substituer les corrélations spatiales par les corrélations temporelles. Ceci permet de transcrire une série spatiale en série temporelle, ainsi, le nombre d'onde $k = 2\pi/\ell$ peut s'écrire sous la forme :

$$k = \frac{2\pi f}{U} \quad (4.10)$$

où f est la fréquence et $U = \langle u \rangle$. Dans l'hypothèse d'une turbulence homogène, l'analyse fréquentielle est supposée équivalente à l'analyse de la variation de la vitesse avec le nombre d'onde k (Batchelor, 1953). L'équation (4.13) peut alors s'exprimer comme :

$$E(f) = C'\varepsilon^{2/3}f^{-5/3} \quad (4.11)$$

où

$$C' = C \left(\frac{U}{2\pi} \right)^{5/3} \quad (4.12)$$

Dans la zone inertielle, la relation (4.13) peut alors être utilisée pour estimer ε lorsque les

échelles de viscosité ne sont pas résolues par les mesures (Lien et D’Asaro, 2006, Thomson et al., 2012, Renosh et al., 2014) :

$$\varepsilon = \left(\frac{C_0}{C}\right)^{3/2} \left(\frac{2\pi}{U}\right)^{5/2} \quad (4.13)$$

C_0 étant l’ordonnée à l’origine de la densité spectrale de puissance $E(f) = C_0 f^{-5/3}$ (Fig. 4.5) représentée dans un diagramme log-log. À partir de l’expression de ε , il est possible d’estimer l’échelle intégrale L telle que (Pope, 2000) :

$$L = \frac{\sigma_u^3}{\varepsilon} \quad (4.14)$$

où u est la vitesse de l’écoulement instantané au point de mesure.

Dans la suite, nous utilisons ces relations pour estimer ε , L et η afin de caractériser approximativement l’écoulement.

4.2.2 Mesures de la turbulence en milieu marin

Le début des années 1960 marque les prémices des études expérimentales sur la turbulence en milieu marin. En utilisant la courantographie électromagnétique, Grant et al. (1962) ont établi le spectre de turbulence au voisinage du fond dans la Discovery Passage (Canada). En accord avec la théorie de Kolmogorov (Kolmogorov, 1941), les auteurs ont mis en évidence la présence d’une zone inertielle dans le domaine des hautes fréquences. Dans les années 1970-1980, ce comportement du spectre de turbulence a été une nouvelle fois vérifié (Soulsby, 1977, Heathershaw, 1979, Gross et Nowell, 1985).

Par la suite, le développement des instruments acoustiques à effet Doppler a grandement contribué aux progrès dans la compréhension des structures turbulentes. Les ADCPs et les AWACs (Acoustic Wave and Current), apparus au milieu des années 1980, sont encore largement utilisés de nos jours.

Néanmoins, l’utilisation de faisceaux divergents (systèmes ADCPs) et la non-homogénéité

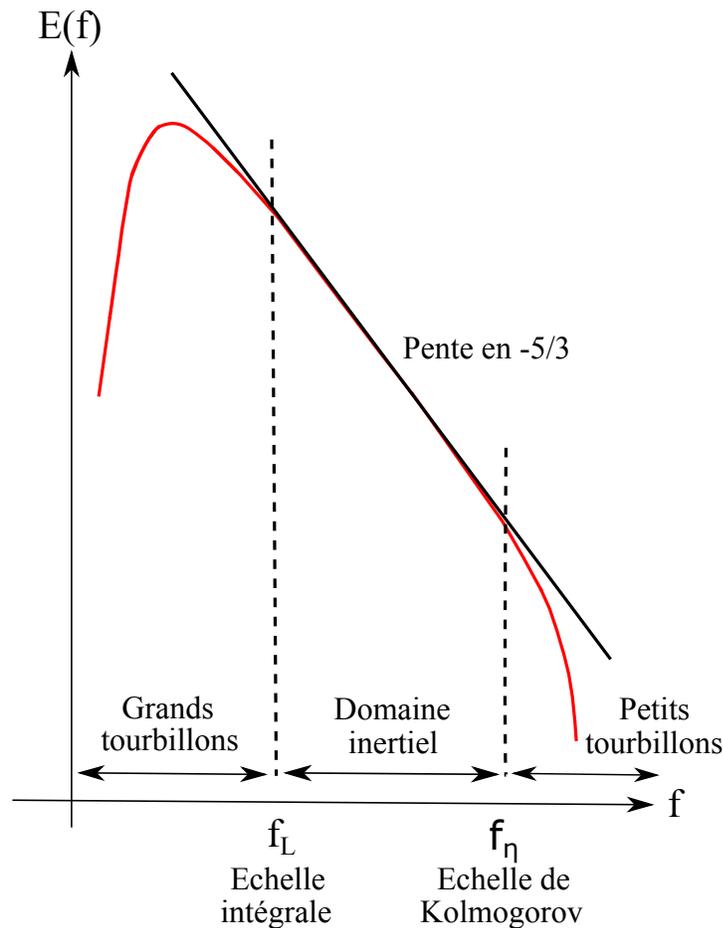


FIGURE 4.5 – Cascade de Richardson dans l’espace fréquentiel.

de l’écoulement le long de chaque faisceaux d’émission ne permet pas de mesurer instantanément les composantes tridimensionnelles de la turbulence. En dépit de cette limitation, le domaine inertiel peut être déterminé pour les échelles de longueur supérieure à 1 m, permettant une estimation du taux de dissipation moyen en fonction de la profondeur (e.g. [Osalusi et al., 2009](#), [Bouferrouk et al., 2016](#)).

Le milieu des années 1990 voit émerger de nouveaux appareils de mesure de vitesse de courant : les vélocimètres acoustiques Doppler (ADV). Ces instruments de haute résolution sont destinés à l’étude des phénomènes à fluctuations rapides notamment la turbulence ([Lohrmann et al., 1994](#)). Dotés de faisceaux convergents, ils permettent de mesurer dans

une petite cellule ($\sim 1 \text{ cm}^3$) à un taux d'échantillonnage assez élevé ($\sim 100 \text{ Hz}$). Cet instrument est à l'origine de nombreuses études de quantifications des paramètres turbulents de l'écoulement. Ayant prouvé son efficacité dans des zones de faibles intensités de courant ($< 1 \text{ m/s}$) (Kim et al., 2000, Sherwood et al., 2006, Walter et al., 2011), l'ADV est aujourd'hui déployé sur des sites potentiel d'énergie marine où la vitesse moyenne de courant atteint 2 m/s (Thomson et al., 2012, McCaffrey et al., 2015, Milne et al., 2016).

Compte tenu des avantages propres aux ADVs et aux ADCPs, il est préférable d'étudier la turbulence en utilisant ces deux instruments simultanément. Cette méthodologie a été employée par Thomson et al. (2012) dans le Puget Sound (USA) et par Milne et al. (2013, 2016) dans le Sound of Islay en Écosse. L'utilisation conjointe de ces deux appareils permet avant tout de comparer les valeurs de certains paramètres turbulents, en particulier le taux de turbulence I_u , obtenu par l'un et l'autre des appareils. Ainsi, Milne et al. (2016) ont révélé un écart dans l'estimation de I_u pouvant atteindre 5%.

4.2.3 Ordre de grandeurs des paramètres turbulents en milieu marin

Parmi les différents paramètres de la turbulence, le taux de turbulence est généralement considéré comme la grandeur la plus pertinente dans l'étude des charges hydrodynamiques qui s'appliquent sur la structures des hydroliennes (Lloyd, 2005, McCann et al., 2008, Milne et al., 2010).

À l'aide de mesures ADV, ce paramètre a été quantifié dans le Puget Sound, à une hauteur $z/h = 0,2$ au dessus du fond marin par Thomson et al. (2012) et McCaffrey et al. (2015), z étant la hauteur au dessus du fond marin et h la profondeur totale. Pour des vitesses maximales atteignant $1,5 \text{ m/s}$, les auteurs ont recensé des valeurs de I_u comprises entre 7% et 10% pour une valeur moyenne de 8,4%. Une étude similaire a été menée par MacEnri et al. (2013) sur le site d'implantation de l'hydrolienne SeaGen. À l'aide d'un courantmètre électromagnétique, les auteurs ont estimé un taux de turbulence de l'ordre de 5,5% au niveau du moyeu de l'hydrolienne pour des vitesses de courant de $3,5 \text{ m/s}$. Récem-

ment, des déploiements d'ADVs à mi-hauteur de la colonne d'eau ont été menés dans l'East River à New York (Gunawan et al., 2014). Les taux de turbulence de flot et de jusant ont été estimés à 13% et 18% respectivement pour des pics de vitesse de 2,4 m/s et 1,6 m/s.

Quantifier l'échelle à laquelle la turbulence se distribue sur un site d'énergie marine est crucial pour l'optimisation du design des hydroliennes et pour la vérification des modèles de turbulence. En la matière, l'estimation de l'échelle intégrale L est souvent privilégiée. Bien que la quantification de ce paramètre constitue une étape nécessaire au processus de quantification du potentiel d'un site d'énergie tidale, peu d'études sont référencées dans la littérature. Néanmoins, Milne et al. (2013) ont relevés des valeurs de L de 10 m et 13 m pour les phases de flot et de jusant à une hauteur $z/d = 0,1$ dans le Sound of Islay. McCaffrey et al. (2015) ont estimé une valeur de L de 11,6 m à une hauteur $z/d = 0,2$ dans le Puget Sound. Sur le même site, Nezu et Nakagawa (1995) ont estimé l'échelle intégrale telle que $L = \sqrt{zh}$, à l'aide d'un modèle numérique. Leurs résultats montrent un écart dans l'estimation de L de seulement 7% par rapport à l'étude expérimentale de McCaffrey et al. (2015).

Le taux de dissipation ε est un autre paramètre pertinent utilisé pour caractériser la turbulence. Dans le domaine inertiel, l'énergie associée aux fluctuations de vitesse est indépendante de la viscosité et est seulement liée au taux de dissipation et à la taille des tourbillons. Ainsi, une mesure de ε est une mesure de la variance de la vitesse de l'écoulement. McMillan et al. (2016) ont évalué ce paramètre à l'aide de mesures ADCP et de VMP (Vertical Microstructure Profiler) déployés dans le Grand Passage, Nova Scotia (Canada). Les auteurs ont mis en évidence de fortes variations spatio-temporelles du taux de dissipation avec des valeurs de ε comprises entre 10^{-8} et $10^{-3} \text{ m}^2\text{s}^{-3}$.

Enfin, la quantification de l'échelle de Kolmogorov η permet d'estimer l'échelle à laquelle l'écoulement devient visqueux. En milieu naturel, η est de l'ordre du millimètre (Luznik et al., 2007, Schmitt et Huang, 2016).

4.3 Méthodologie, cadre expérimental

4.3.1 Présentation du site

L'Escaut s'étend sur 355 km de la source à l'embouchure. Le fleuve prend sa source dans le nord de la France, à environ 110 m au-dessus du niveau de la mer. Il s'élargit graduellement lors de sa traversée de la Belgique et des Pays-Bas puis laisse progressivement place à la Mer du Nord. L'onde de marée se propage jusqu'à 160 km de l'embouchure avant d'être entravée par une succession d'écluses.

La partie belge de l'estuaire, le « Zeeschelde », s'étirant sur 105 km (Fig. 4.6), est caractérisée par un seul chenal de jusant/flot. Du fait de la morphologie de l'estuaire en forme d'entonnoir, l'amplitude verticale moyenne de la marée parvient à son maximum (6 m) dans les zones d'eau douce affectées par les marées.

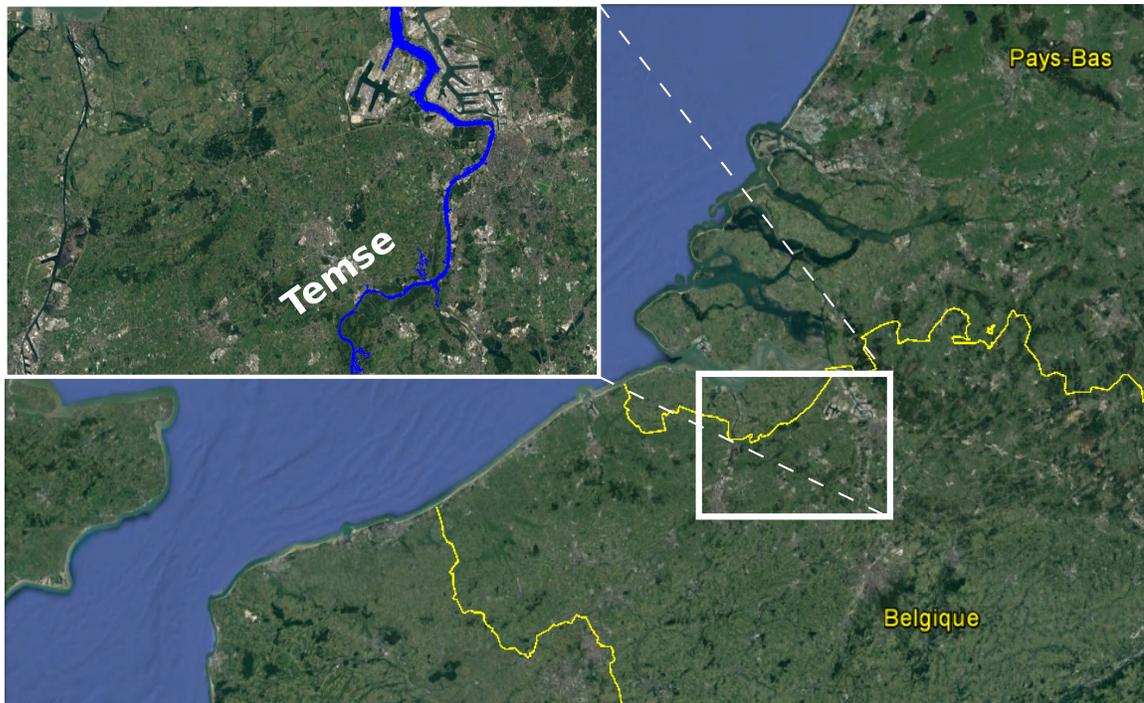


FIGURE 4.6 – Emplacement du « Zeeschelde » (en bleu sur le panneau en haut à gauche) et de la ville de Temse.

Le « Zeeschelde », considéré comme une voie navigable est sous la juridiction de « Waterwegen and Zeekanaal » (abrégé W&Z dans la suite du texte). En s'efforçant d'assurer une gestion dynamique et durable des voies d'eau, W&Z cherche à encourager leurs utilisations. Par l'intermédiaire du projet Pro-Tide, W&Z s'est porté garant d'un projet de récupération de l'énergie du courant de marée dans le « Zeeschelde ». Cette prise d'initiative démontre la volonté de W&Z de s'inscrire dans une perspective de développement durable.

4.3.2 Sélection du meilleur site de test de prototypes d'hydroliennes

Dans une étude portant sur la faisabilité d'un projet de récupération d'énergie tidale dans le « Zeeschelde » (IMDC, 2011), un cahier des charges a été dressé afin d'identi-

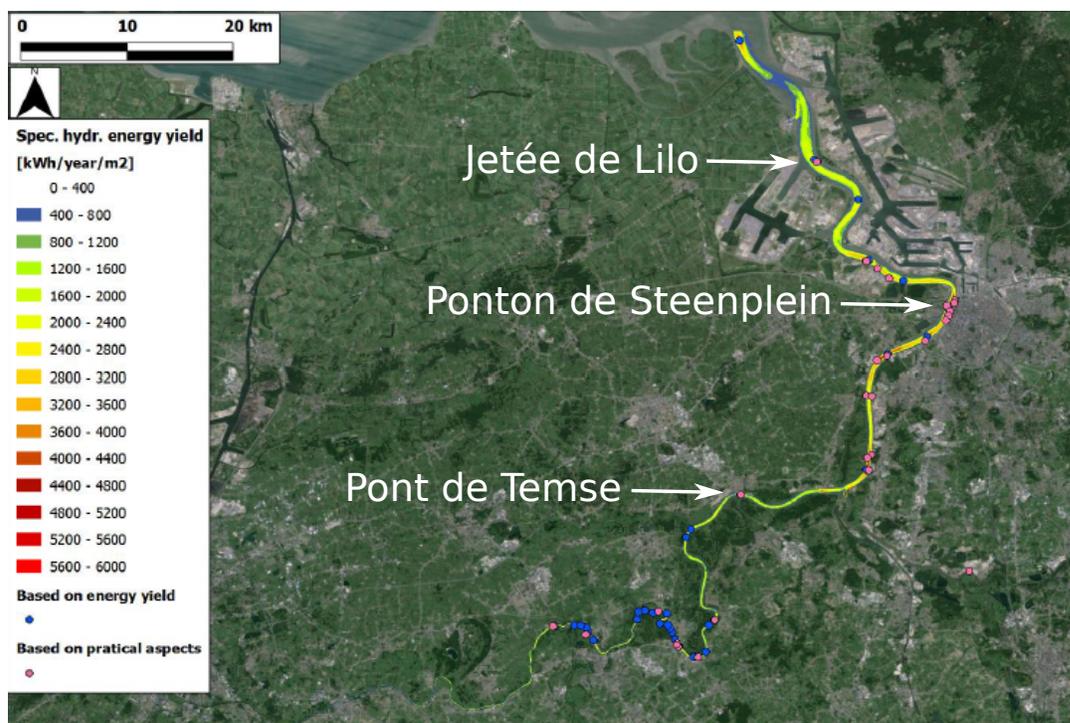


FIGURE 4.7 – Sélection des meilleurs emplacements pour le test de prototypes d'hydroliennes. Les sites les plus énergétiques sont représentés par les points bleus, les sites respectant les aspects administratifs, légaux et pratiques sont identifiés par les points roses. La position géographique des villes de Lilo, Steenplein et Temse, mentionnées dans le texte, est également indiquée. Extrait de Goormans et al. (2013).

fier le meilleur site d'implantation de prototypes d'hydroliennes. La sélection du meilleur emplacement s'est basée sur deux critères :

- Le potentiel hydrocinétique présent dans l'écoulement de marée (évalué par un modèle numérique 2D).
- Les aspects administratifs (conflits d'usages), légaux et pratiques dont notamment la prise en considération des contraintes de navigation.

Sur la base de ces deux critères, trois secteurs ont été sélectionnés. Il s'agit de sites à proximité de la jetée de Lilo, du ponton de Steenplein et du pont de Temse (Fig. 4.7). Afin de sélectionner le meilleur emplacement pour le test de prototypes d'hydroliennes, chacun des trois sites a été investigué de manière plus approfondie.

À partir de mesures *in situ* ADCP et RCM (Recording Current Meter) récoltées au cours d'une période d'un mois en juin-juillet 2013 (Van Troos et al., 2014), la distribution

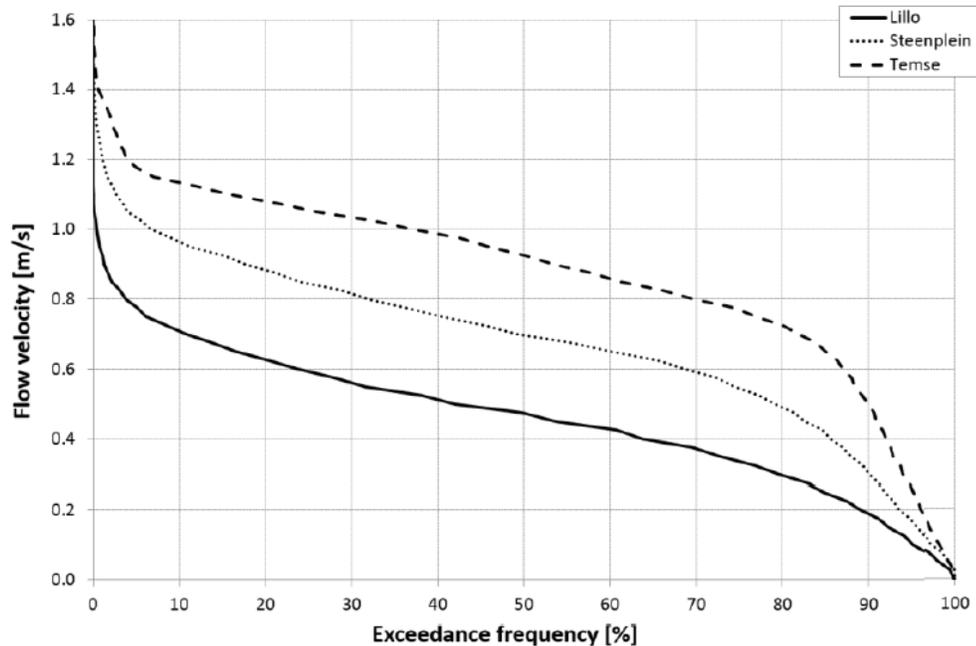


FIGURE 4.8 – Distribution cumulative des occurrences de vitesse (moyennée dans la colonne d'eau) obtenues à partir des mesures ADCP et RCM effectuées à proximité de la jetée de Lilo, du ponton de Steenplein et du pont de Temse. Extrait de Goormans et al. (2013).

cumulative des occurrences de vitesse (moyennée dans la colonne d'eau) a été établie (Fig. 4.8).

Il apparaît clairement que le site de Temse offre les vitesses les plus élevées. D'autre part la gamme des vitesses enregistrées (0 - 1,6 m/s) sur ce site est plus étendue que celles observées à Lilo et à Steenplein. Cette spécificité offre des perceptives intéressantes en termes de plages de fonctionnement des prototypes d'hydroliennes.

Compte tenu de ces observations, le choix du site de test s'est naturellement porté vers celui de Temse.

4.3.3 Site de Temse

Le site expérimental a été conçu pour recevoir des turbines de prototypes d'hydroliennes de type Darrieus pour des essais en conditions réelles sur une période de plusieurs mois. Sur ce site, les phases de flot et de jusant dure 5,5 et 7 heures respectivement. La

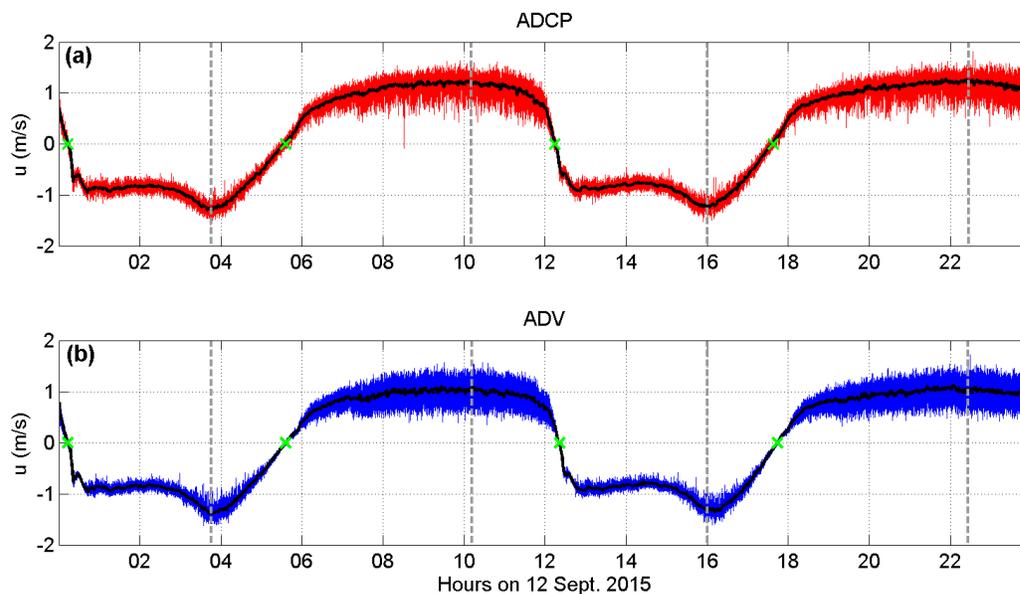


FIGURE 4.9 – Séries temporelles de la vitesse de l'écoulement u par ADCP (a) et ADV (b) le 12 septembre 2015. Les lignes en pointillées gris indiquent les valeurs maximales de vitesse enregistrées pendant la phase de flot (u négatif) et de jusant (u positif). Les vitesses nulles sont indiquées par des croix vertes.

durée de l'étale de courant est très faible, la vitesse de l'écoulement varie de 1 m/s à - 1 m/s en seulement 30 minutes. D'autre part, la vitesse moyenne de jusant est d'environ 0,2 m/s supérieure à celle de flot. Cette asymétrie est engendrée par la forme particulière de la courbe de vitesse avec la présence d'un point selle pendant la phase de flot (Fig. 4.9).

Un ponton flottant (3 m × 39 m) a été installé au milieu de l'Escaut entre deux pieux orientés dans le sens du courant (Fig. 4.10). À l'emplacement du ponton, la largeur de l'estuaire et la profondeur moyenne sont d'environ 300 m et 8 m respectivement. Les prototypes d'hydroliennes ont été installés sur un côté du ponton. Les vitesses de l'écoulement ont été enregistrées simultanément par un ADV et un ADCP, tous deux installés sur un rail d'acier à l'extrémité du ponton, en aval de la turbine (Fig. 4.11). L'ADV a été aligné avec la ligne médiane de l'hydrolienne alors que l'ADCP était décalé d'environ 1 m.

4.3.4 Mesures ADV et ADCP

ADV

Un ADV enregistrait les trois composantes de la vitesse de l'écoulement à une fréquence d'acquisition de 16 Hz, 1 m sous la surface. Les mesures ont couvert différents stades de marée : le flot et le jusant avec des vitesses supérieures à 1,2 m/s ainsi que la renverse de courant (Fig. 4.9). Quatre déploiements ont été effectués sur le site d'essai en utilisant une configuration identique. Au cours d'un déploiement, deux ADV ont enregistré des vitesses simultanées avec une fréquence d'échantillonnage de 16 et 32 Hz. La plus longue période d'acquisition de données a duré 12 cycles de marée (11/09 - 18/09/2015). La distance entre le prototype d'hydrolienne et l'ADV est estimée à $9D$ (18 m), D étant le diamètre de la turbine (Fig. 4.12). Afin d'obtenir la vitesse dans la direction de l'écoulement, les vitesses horizontales enregistrées ont été projetées sur l'axe longitudinal et transversal de l'écoulement du fleuve en effectuant une rotation de 13° de l'ellipse de courant dans le sens indirect. Des séries temporelles de la vitesse dans la direction longitudinale de l'écoulement (com-

posante u) et de la vitesse d'écoulement transversal (composante v) ont donc été générées pour une analyse ultérieure.



FIGURE 4.10 – Ponton flottant acheminé vers le site de test à proximité du pont de Temse.

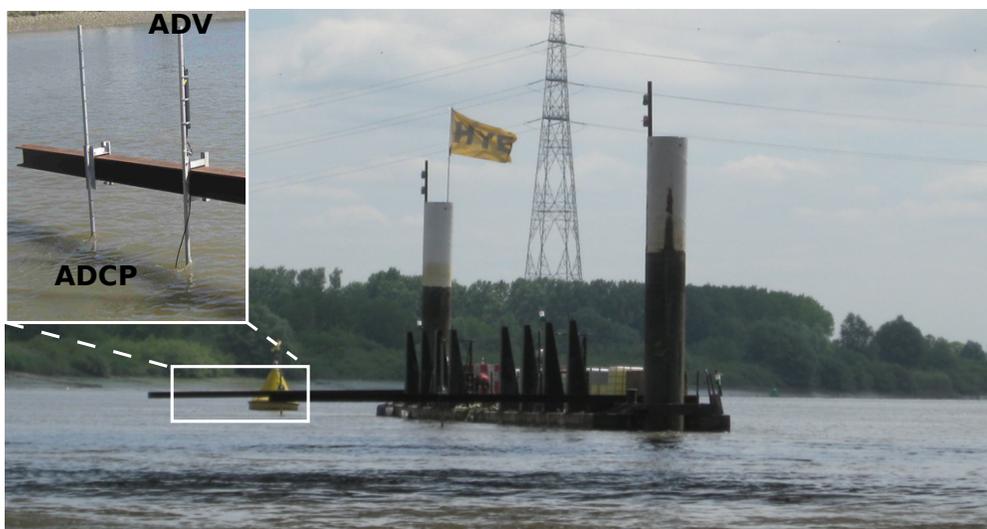


FIGURE 4.11 – ADV et ADCP, installés sur un rail métallique à l'extrémité du ponton.

ADCP

Un ADCP RDI de 1 200 kHz monté sur un châssis fixe à côté de l'ADV mesurait la vitesse du courant au cours de différentes périodes de tests d'hydroliennes. L'instrument fournissait un profil instantané de vitesse par seconde. Chaque enregistrement de vitesse était la moyenne de trois mesures d'impulsion sonore, fournissant une précision sur l'acquisition de vitesse de 0,04 m/s. Les vitesses ont été mesurées avec une résolution verticale de 0,25 m (taille des bins), de 0,9 m sous la surface (milieu du premier bac) jusqu'au fond. Dans cette étude, les données de vitesse fournies par l'ADCP ont été utilisées pour l'estimation de la variabilité temporelle de la vitesse de courant ainsi que pour l'étude de l'asymétrie des vitesses de courant et de direction. Elles ont également été employées pour la comparaison avec les données de l'ADV.

4.4 Prototypes d'hydroliennes

Cette section donne un aperçu des sociétés privées, partenaire du projet Pro-Tide et de leur technologie installée sur le site de Temse.

4.4.1 Water2Energy

Water2Energy Ltd (notée W2E dans la suite du texte) est une compagnie néerlandaise active dans le secteur des énergies marines depuis 2007. L'activité principale de W2E est la conception et la construction d'une turbine à axe vertical de type Darrieus, reposant sur un support fixe et flottant.

Le design des turbines à axe vertical est aujourd'hui largement répandu. Cependant la grande majorité des concepteurs ont recours à des designs à angle de calage (« pitch angle ») fixe. L'originalité du prototype de W2E réside dans l'intégration d'un système (en instance de brevet) à angle de calage variable aussi appelé « pitch control » (Muljadi et Butterfield, 2001). Il s'agit d'un système de régulation hydrodynamique actif. Il consiste à faire varier

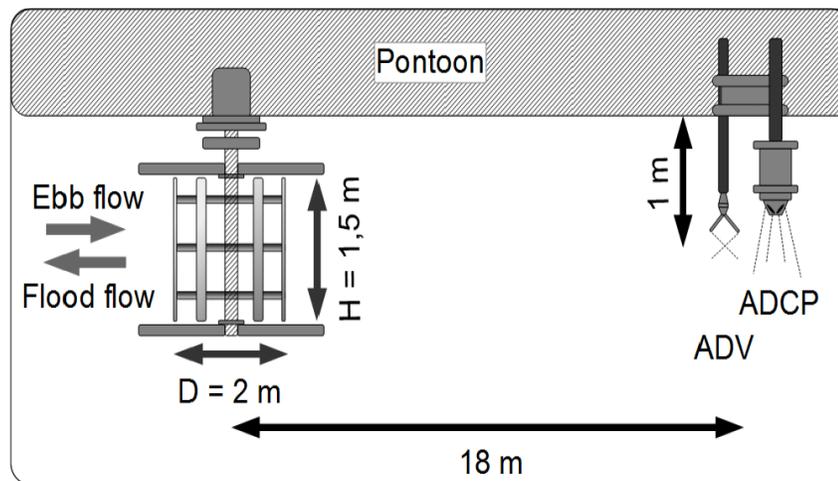


FIGURE 4.12 – Vue schématique de la configuration expérimentale. L’ADV était installé à une distance de 9 fois le diamètre D de la turbine W2E.

l’angle de calage des pales sur le moyeu à l’aide de vérins hydrauliques autour d’un axe longitudinal pour profiter au maximum du courant instantané. La variation de l’angle de calage entraîne une diminution ou une augmentation de la portance de la pale, donc du couple moteur. Un système de contrôle permet de déterminer la meilleure position des pales en fonction de la vitesse du courant et commande le système hydraulique afin d’exécuter le positionnement. Ce système permet une régulation constante et presque parfaite de la rotation du générateur en bout de ligne et donc de la puissance. Cette technologie a permis à W2E d’augmenter le coefficient de puissance C_p (efficacité) de son hydrolienne de 10 à 15% par rapport à des conceptions plus traditionnelles dont le C_p est d’environ 0,2 à 0,25.

Pour les tests menés dans l’Escaut, W2E a opté pour un prototype d’hydrolienne à 4 pales de diamètre D égale à 2 m et de hauteur H égale à 1,5 m. Ces dimensions lui permettaient ainsi de balayer une surface S de 3 m². Le système de récupération d’énergie était monté sur le flotteur « Dragonfly II », équipé d’un dispositif de basculement spécial pour la turbine en acier inoxydable (Fig. 4.13). Le prototype a été installé dans l’Escaut pendant 6 semaines, du 20 octobre au 11 décembre 2014. Au cours du déploiement, les ingénieurs de W2E ont opté pour un fonctionnement de leur turbine au cours d’une seule

phase de marée : le flot.

Les paramètres suivants ont été mesurés par W2E à une fréquence d'acquisition de 100 Hz :

- Le couple
- La vitesse angulaire
- La puissance en sortie



FIGURE 4.13 – Vue latérale du flotteur « Dragonfly II » (haut) et dispositif complet (flotteur + turbine) installé le long du ponton (bas). Source : www.water2energy.nl

4.4.2 Blue Energy Canada

Blue Energy Canada Ltd (notée BEC dans la suite du texte) est une entreprise basée à Vancouver, en Colombie-Britannique. Elle développe une hydrolienne à axe vertical de type Darrieus, vouée à une installation en milieu fluvial. La société a été fondée dans la continuité des travaux initialement menés par le « National Research Council of Canada ». Les tests réalisés dans l'Escaut font suite à des recherches expérimentales et des tests en bassin menés à l'Université de Colombie-Britannique - UBC (Rawlings, 2008).

Le design du prototype d'hydrolienne à 4 pales de BEC est celui d'une turbine carénée disposant d'un rotor de diamètre D égale à 2 m de diamètre et de hauteur H égale à 1 m. Ces dimensions lui permettaient de balayer une surface S de 2 m². La turbine était installée dans un conduit (carénage) symétrique en arc de cercle (Fig. 4.14). Les différents tests réalisés dans le bassin d'essai d'UBC ont montré que l'utilisation de ce conduit augmente



FIGURE 4.14 – Photographie du prototype d'hydrolienne BEC lors de son installation dans l'Escaut.

le coefficient de puissance de 75% par rapport à une turbine sans carénage.

Le rotor était positionné dans un conduit symétrique flottant de 3,3 m de largeur permettant de réduire les vibrations et les forces hydrodynamiques qui s'appliquent sur les pales (Malipeddi et Chatterjee, 2012). L'hydrolienne était dotée d'un système à angle de calage variable. En maximisant l'énergie absorbée par l'hydrolienne, ce système en « pitch control » facilitait la mise en déclenchement de la turbine (Lazauskas et Kirke, 2012) et permettait d'en augmenter le rendement énergétique (Rawlings, 2008). L'hydrolienne a été installée dans l'Escaut pendant 14 semaines, du 9 juillet au 15 octobre 2015. La puissance générée par la turbine, en phase de flot et de jusant, a été enregistrée avec une fréquence d'acquisition de 1 Hz.

4.5 Évaluation du coefficient de puissance et de couple

Pour exprimer les caractéristiques de puissance d'une hydrolienne, on utilise le coefficient de puissance C_p . Il se définit comme le rapport de la puissance P_{exp} générée par l'hydrolienne sur la puissance théorique P_{th} disponible dans l'écoulement amont sur une surface correspondant à l'aire S balayée par les pales :

$$C_p = \frac{P_{\text{exp}}}{P_{\text{th}}} = \frac{P_{\text{exp}}}{(1/2)\rho S U^3} \quad (4.15)$$

Dans le cas d'hydrolienne de type Darrieus, la surface de balayage S est fonction du diamètre D de la turbine et de sa hauteur H :

$$S = D.H \quad (4.16)$$

L'efficacité maximale d'une turbine a été déterminée indépendamment par Betz (1920) et Joukowsky (1920) sur les bases de considérations théoriques. En condition d'écoulement uniforme, cette efficacité idéale est égale à $C_{p_{\text{max}}} \sim 0,593$.

Le coefficient de puissance C_p est une fonction de la vitesse spécifique (« Tip Speed Ratio », TSR) :

$$\lambda = \frac{\Omega R}{U} \quad (4.17)$$

où Ω est la vitesse de rotation du rotor et R son rayon. On peut ainsi réécrire C_p tel que $C_p = C_p(\lambda)$. Ce coefficient permet d'évaluer la puissance P disponible sur l'arbre de l'hydrolienne :

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho S U^3 \quad (4.18)$$

Le couple sur l'arbre est donné par :

$$\Gamma = \frac{P}{\Omega} = \frac{C_p}{\lambda} \rho H U^2 R^2 \quad (4.19)$$

ou par la relation :

$$\Gamma = C_\Gamma \rho H U^2 R^2 \quad (4.20)$$

où C_Γ est le coefficient de couple relié au coefficient de puissance par la relation :

$$C_p(\lambda) = \lambda C_\Gamma(\lambda) \quad (4.21)$$

Les formes typiques des caractéristiques $C_p(\lambda)$ et $C_\Gamma(\lambda)$ pour une hydrolienne sont présentées sur la Fig. 4.15.

4.6 Analyse spectrale de signaux stochastiques

La nécessité d'introduire la notion de signal aléatoire ou de processus stochastique dans ce manuscrit de thèse provient de la constatation facile à établir que le cadre défini par les signaux déterministes est insuffisant pour d'écrire et étudier l'ensemble des problèmes rencontrés en traitement du signal. Partant du fait qu'un signal « naturel » comme celui de la vitesse de courant de marée est fortement turbulent, la limitation du modèle déterministe

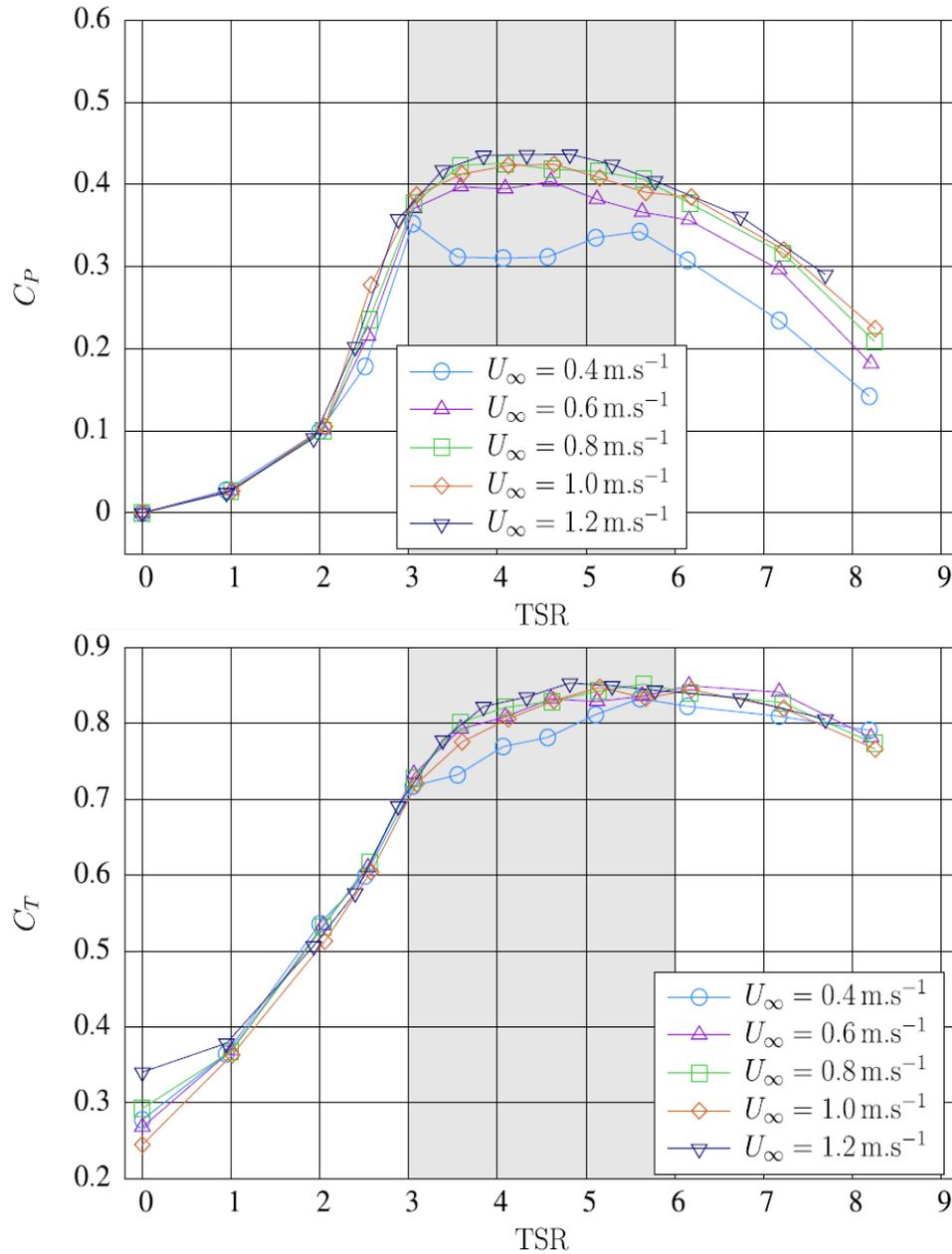


FIGURE 4.15 – Courbes caractéristiques du coefficient de puissance $C_p(\lambda)$ (haut) et de couple $C_T(\lambda)$ (bas) en fonction de la vitesse spécifique λ (notée TSR sur cette figure). Ces courbes ont été obtenues à la suite d’essais expérimentaux d’un prototype d’hydrolienne tripales de 0,8 m de diamètre, réalisés dans le bassin de houle et courant de l’Ifremer de Boulogne/mer (Mycek et al., 2014). Les tests ont été effectués à différentes vitesses U_∞ d’écoulement amont.

des signaux apparaît clairement.

L'enregistrement des mesures de courant ou de la puissance générée par une hydrolienne révèle de nombreuses fluctuations liées aux phénomènes turbulents présent dans l'écoulement. L'étude de ces fluctuations nécessite le développement d'outils de traitement spécifique à ce type de données. Ces outils sont présentés dans cette section.

4.6.1 Statistique d'ordre 2

Dans le cadre de cette thèse, les mesures de vitesse du courant de marée et de la puissance générée par une hydrolienne ont été considérées comme des variables aléatoires. La puissance étant dépendante de la vitesse, il est possible d'appliquer une statistique d'ordre 2 au traitement des signaux de ces deux quantités.

Considérons un couple de variables aléatoires $X_1 = X(t_1)$ et $X_2 = X(t_2)$ dont la fonction de répartition est :

$$F_{\mathbf{X}} = \text{Prob}(X_1 \leq \xi_1, X_2 \leq \xi_2) \quad (4.22)$$

et la densité de probabilité :

$$p_{\mathbf{X}}(\xi_1, \xi_2) = \frac{\partial^2 F_{\mathbf{X}}}{\partial \xi_1 \partial \xi_2} \quad (4.23)$$

où ξ_1 et ξ_2 sont les valeurs prises par $X(t_1)$ et $X(t_2)$.

Pour la comparaison des variables aléatoires, on utilise la fonction d'autocorrélation statistique :

$$R_{xx}(t_1, t_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \xi_1 \xi_2 p_{\mathbf{X}}(\xi_1, \xi_2) d\xi_1 d\xi_2 \quad (4.24)$$

4.6.2 Stationnarité et ergodisme

Pour accéder aux propriétés essentielles d'un signal physique il peut être commode de le considérer comme une réalisation d'un processus aléatoire. Le problème est largement simplifié si le processus associé au signal peut être considéré comme un processus

stationnaire, c'est-à-dire si ses propriétés statistiques caractérisées par des espérances mathématiques, sont indépendantes du temps. Lorsque cette hypothèse est vraisemblable, le processus bâti autour du signal est rendu ergodique, les moyennes temporelles étant identiques aux moyennes d'ensemble.

La conséquence de cette ergodicité est très importante en pratique. Elle permet de remplacer les calculs de moments statistiques (qui supposent connues les densités de probabilité ou les fonctions de répartition) par les moyennes temporelles sur une seule réalisation (observation). En pratique, faire une estimation de la moyenne temporelle sur une fenêtre de taille infinie est impossible. Il faut se contenter d'une approximation calculée sur une fenêtre de taille finie, qui tendra asymptotiquement, avec la taille de la fenêtre, vers la moyenne temporelle.

L'hypothèse ergodique est admise dans de nombreux modèles théoriques, facile à réaliser dans des simulations numériques, beaucoup plus difficile voire impossible à justifier à propos d'un signal réel, faute de pouvoir accéder à d'autres réalisations du même processus. Il faut très généralement se contenter d'une justification grossière, utilisée par exemple dans l'analyse des enregistrements des vitesses de courant, qui consiste à dire qu'un enregistrement d'une trentaine de minutes est assez court pour assurer la stationnarité (il est peu probable que les conditions météorologiques aient été modifiées) mais assez long pour qu'il fournisse des informations statistiques pertinentes. Dans ce travail de thèse de multiples périodes d'une durée d'une à quatre heures ont été analysées au sens statistique. Ces courtes périodes ont permis de justifier l'hypothèse stationnaire.

Sous cette hypothèse, la fonction de répartition $F_{X_1, X_2}(\xi_1, \xi_2)$ ne dépend, à l'ordre 2, que de la différence $t_1 - t_2 = \tau$. Par conséquent on peut définir la fonction d'autocorrélation comme :

$$R_{xx}(t_1, t_2) = R_{xx}(\tau) \quad (4.25)$$

4.6.3 Densité spectrale de puissance

Pour une réalisation ζ_i donnée, le processus aléatoire $X(t, \zeta)$ se réduit à une fonction $x(t, \zeta_i)$ que l'on notera simplement $x_i(t)$: c'est un signal aléatoire.

Comme pour les signaux certains à puissance moyenne finie, la transformée de Fourier d'une réalisation $x_i(t)$ d'un processus aléatoire n'existe pas, car l'intégrale :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |x_i(t)| dt \quad (4.26)$$

ne converge pas.

On peut définir la densité spectrale de puissance (DSP) comme la limite de la DSP sur une fenêtre de largeur T , lorsque $T \rightarrow +\infty$ si la limite existe. Soit $x_i(t)$ une réalisation d'un processus aléatoire $X(t, \zeta)$, notons :

$$x_i(t, T) = x_i \text{rect}(t/T) \quad (4.27)$$

sa restriction sur une fenêtre de largeur T centrée sur l'origine (Fig. 4.16) qui vérifie évidemment : $\lim_{T \rightarrow +\infty} x_i(t/T) = x_i(t)$. La fonction $x_i(t, T)$ (à énergie finie) admet en général une transformée de Fourier :

$$x_i(t, T) \Leftrightarrow X_i(f, T) = \int_{-\infty}^{+\infty} x_i(t, T) e^{-j2\pi ft} dt = \int_{-T/2}^{+T/2} x_i(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (4.28)$$

La puissance moyenne de $x_i(t, T)$ est donnée par :

$$P_{x_i, T} = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{+\infty} |X_i(f, T)|^2 df = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{x_i} S_{x_i}(f, T) df \quad (4.29)$$

où $S_{x_i} S_{x_i}(f, T) = |X_i(f, T)|^2 / T$ est la DSP de $x_i(t, T)$. Cette DSP est une grandeur aléatoire car elle change pour chaque nouvelle réalisation de $x_i(t)$: on l'appelle aussi périodogramme.

La densité spectrale de puissance d'un processus aléatoire stationnaire est la transfor-

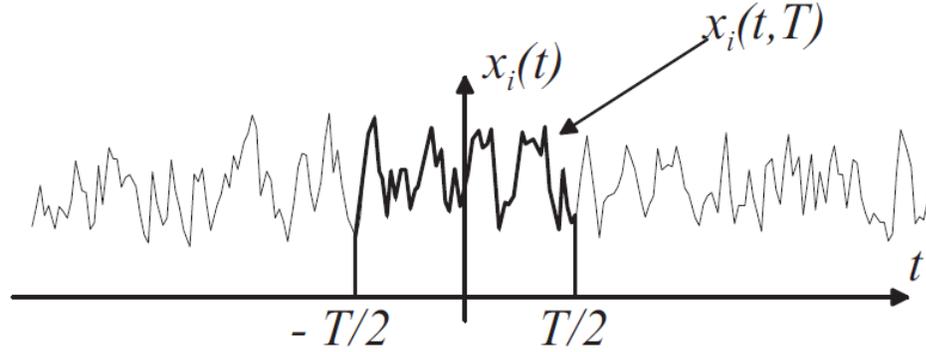


FIGURE 4.16 – Restriction $x_i(t, T)$ d'une réalisation $x_i(t)$ d'un processus aléatoire.

mée de Fourier de sa fonction d'autocorrélation :

$$S_{xx}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (4.30)$$

En pratique, $S_{xx}(f)$ ne peut pas être calculée. Il s'agit d'une quantité purement théorique. Cependant, si le signal est stationnaire et ergodique, on peut approximer la DSP par des périodogrammes moyennés :

$$\hat{S}_{xx}(f) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N S_{x_n x_n}(f, T) = \frac{1}{NT} \sum_{n=1}^N S|X_n(f, T)|^2 \quad (4.31)$$

4.6.4 Fonction de cohérence

On appelle fonction de cohérence le rapport :

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{|S_{xy}(f)|^2}{S_{xx}S_{yy}} \quad (4.32)$$

Les processus $x(t)$ et $y(t)$ sont dits incohérents à la fréquence f_0 si $\gamma_{xy}^2(f_0) = 0$. Si $\gamma_{xy}^2(f_0) = 1$, $x(t)$ et $y(t)$ sont dits parfaitement cohérents à la fréquence f_0 . Une fonction de cohérence inférieure à 1 indique soit la présence d'un bruit, soit une relation non linéaire entre $x(t)$ et $y(t)$.

Dans ce travail de thèse, $x(t)$ et $y(t)$ ont été interprétés comme étant la vitesse du rotor et la puissance générée par l'hydrolienne W2E. Le calcul de la fonction de cohérence a permis de déterminer le degré de cohérence de séries temporelles de ces deux quantités.

Évaluation de la performance d'hydroliennes dans un écoulement turbulent de marée

Nota : Ce chapitre a fait l'objet d'un article scientifique soumis dans la revue *Philosophical Transactions of the Royal Society A*.

5.1 Introduction

Ce chapitre présente l'ensemble des résultats obtenus lors d'essais de deux prototypes d'hydroliennes dans l'estuaire de l'Escaut (Sea Scheldt en anglais). Nous abordons dans un premier temps l'hydrodynamisme du milieu. Les variations spatiales et temporelles de l'écoulement sont présentées. Les paramètres telles que l'asymétrie des vitesses de courant et l'asymétrie de direction sont quantifiés. En particulier, l'asymétrie de direction de l'écoulement est illustrée à travers la représentation d'ellipses de courant. Les profils de vitesse sont également représentés.

Dans la deuxième section nous présentons les résultats relatifs à l'étude de performance

des deux turbines. L'évolution temporelle de la puissance générée par chaque turbine est présentée conjointement avec l'évolution de la vitesse de courant. L'estimation du coefficient de puissance C_p est estimé. L'évaluation de ce paramètre s'appuie sur les courbes de puissance établies pour chaque prototype.

Enfin, nous abordons dans la dernière section le thème de la turbulence. Les différents paramètres mentionnés dans le chapitre 4 tels que le taux de turbulence I_u , la dissipation ε ou encore l'échelle intégrale L et de Kolmogorov η sont quantifiés. Les spectres de puissance générée et de vitesse de courant sont également présentés.

5.2 Dynamique de marée dans l'estuaire, vitesse d'agitation et taux de turbulence

Les résultats présentés dans cette section s'appuient sur des mesures de courant effectuées par ADCP et ADV dans les semaines précédant le début des campagnes de tests d'hydroliennes. L'objectif de ces mesures était de d'étudier en détail la dynamique locale de marée ainsi que les propriétés turbulentes de l'écoulement.

La dynamique de l'écoulement dans l'Escaut est de loin dominée par la marée. Sur le site de test, l'élévation maximale du niveau de l'eau est de l'ordre de 6 m avec une faible inégalité diurne. Le courant de marée est principalement alternatif avec une vitesse longitudinale dix fois supérieure à la vitesse transversale (Fig. 5.1). Le vecteur vitesse de courant dessine une ellipse de faible excentricité (Fig. 5.2). L'ellipse révèle un léger désalignement entre l'écoulement de flot et de jusant de l'ordre de 7° , 1 mètre sous la surface. L'écoulement tend à s'aligner à mesure que l'on s'éloigne de la surface. Au voisinage du fond, l'écoulement est quasiment unidirectionnel.

D'autre part, l'estimation de l'asymétrie des vitesses de courant a révélé des valeurs de a proches de 0,75 avec néanmoins quelques variations observées au cours des différents déploiements. En moyenne, la vitesse de jusant dans la couche de surface excède 1 m/s alors

que la vitesse de flot est inférieure à 0,8 m/s. Sous des conditions hydrologiques spécifiques (e.g. forte pluie), la vitesse maximale de flot peut dépasser celle de jusant de 0,2 m/s. Ces situations sont toutefois irrégulières. Les vitesses les plus élevées sont atteintes immédiatement après la basse mer et la pleine mer pendant le jusant et le flot respectivement.

La Fig. 5.3 présente les profils de vitesse moyennés sur 10 minutes (courbes noires) pendant les phases de flot et de jusant. Les profils moyens pour une période de trois jours (21 - 24 octobre) pour ces deux phases sont également représentés. On observe une forte décroissance de la vitesse de jusant dans la colonne d'eau. Globalement, la vitesse moyenne estimée dans la couche inférieure (deuxième moitié) de la colonne d'eau est 35% inférieure à celle évaluée dans la couche supérieure (première moitié). Cette décroissance est moins évidente pour la phase de flot au cours de laquelle la diminution de vitesse entre ces deux couches est de l'ordre de 20%. Cet écart est ainsi nettement supérieur pour la phase de

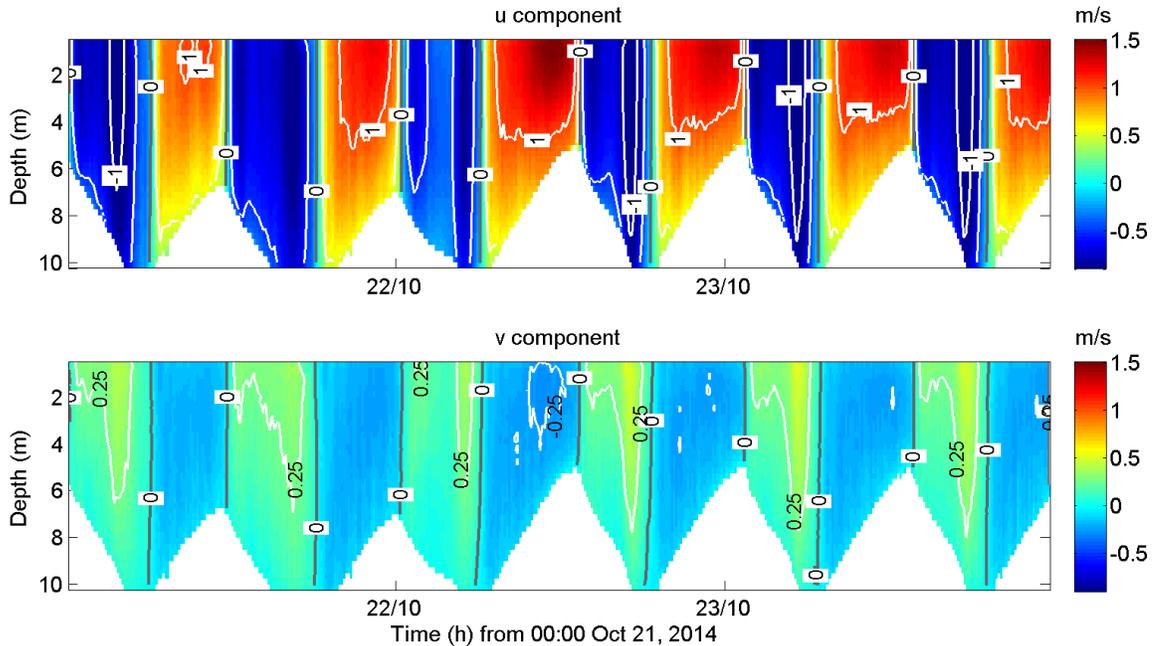


FIGURE 5.1 – Évolution temporelle dans la colonne d'eau, de la vitesse longitudinale u (haut) et transversale v (bas) mesurées par ADCP au cours d'une période de 5 jours en octobre 2014.

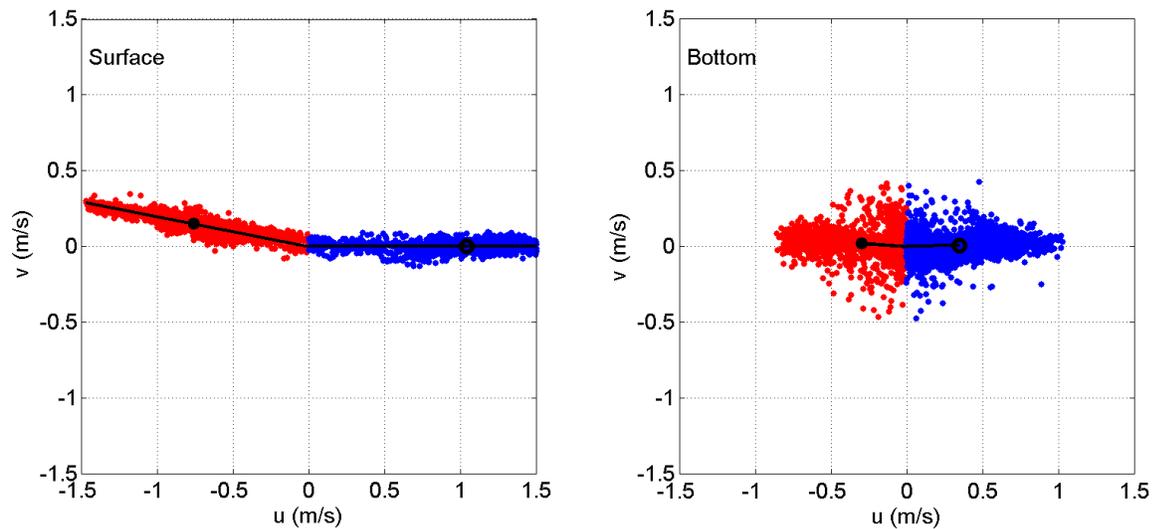


FIGURE 5.2 – Ellipse de courant de marée obtenue par mesure ADCP des vitesses de courant, dans une couche d’un mètre d’épaisseur, sous la surface (gauche) et au dessus du fond (droite). Les points rouges et bleus représentent respectivement la vitesse de flot et de jusant. Les cercles pleins et vides indiquent les valeurs moyennes de la vitesse de flot et de jusant.

jusant que pour la phase de flot. Ceci s’explique par les phénomènes hydrodynamiques qui régissent l’écoulement de jusant. Au cours de cette phase de marée la profondeur totale décroît graduellement. Aussi, les forces de frottements qui régissent l’écoulement à proximité du fond de l’estuaire peuvent se faire ressentir plus haut dans la colonne d’eau en réduisant la vitesse de l’écoulement, en particulier dans la couche inférieure.

Les enregistrements de vitesse de courant effectués par ADV ont été utilisés pour évaluer plus en détail les propriétés turbulentes de l’écoulement. En raison du faible bruit des mesures ADV, ces données de vitesse ont été préférées aux données ADCP. L’enregistrement de la vitesse (longitudinale) au cours d’un cycle de marée typique est représenté sur la Fig. 5.4a.

Le niveau de turbulence ambiante dans un écoulement se caractérise par l’estimation de deux quantités : l’écart type de vitesse σ_u , qui permet de caractériser la vitesse d’agitation et le taux de turbulence I_u . De faibles valeurs de la vitesse transversale v , par rapport à

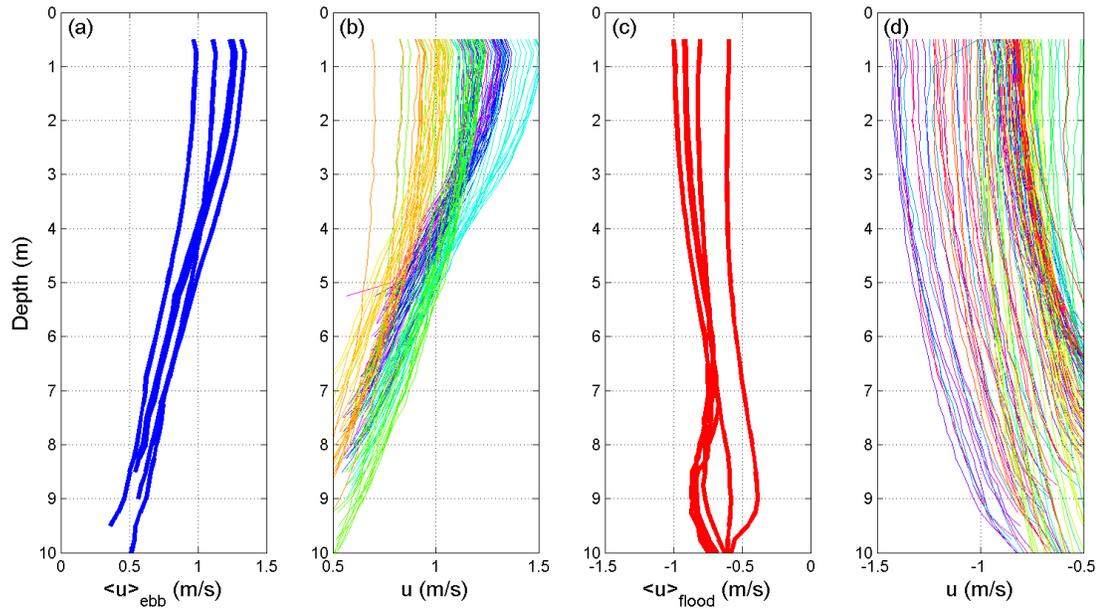


FIGURE 5.3 – Profils de vitesse moyennés sur 10 minutes (courbes multicolores) au cours d’une période de 4 jours en octobre 2014 pour les phases de jusant (b) et de flot (d). Les profils moyens journaliers obtenus pour ces deux phases sont également représentés en bleu et rouge pour les phases de jusant (a) et de flot (c) respectivement.

la composante longitudinale u engendre une augmentation artificielle du taux de turbulence I_v (Tab. 5.1). Cela limite l’analyse de l’évolution de la turbulence à une quantité supérieure à 0,8 m/s pour éviter une augmentation artificielle de I_u . Les résultats présentés dans le Tab. 5.1 révèlent qu’au cours de trois périodes caractéristiques, illustrées par la Fig. 5.4a et

Propriétés de l’écoulement	Vitesse de l’écoulement (m/s)		Écart-type (m/s)		Taux de turbulence	
	$\langle u \rangle$	$\langle v \rangle$	σ_u	σ_v	I_u	I_v
I (flot)	0.9	0.1	0.04	0.04	0.05	0.35
II (flot)	1.25	0.15	0.07	0.06	0.06	0.37
III (jusant)	1.3	0.05	0.07	0.06	0.05	>1

TAB. 5.1 – Propriétés principales de l’écoulement turbulent pour différents stades de marée identifiés sur la Fig. 5.4a.

couvrant les phases de flot et de jusant, le niveau de turbulence ambiante dans l'écoulement change considérablement alors que le taux de turbulence moyen varie dans une gamme faiblement étendue : de 5 à 7%.

En revanche, l'écart-type de vitesse montre une variation plus importante au cours du cycle de marée, en particulier lorsque la vitesse augmente de 0,8 m/s à plus de 1 m/s (Fig. 5.4 et Tab. 5.1). L'écart-type de vitesse caractérise l'amplitude des fluctuations de vitesse à haute fréquence. Pour les forts courants de flot et de jusant ($u > 1$ m/s), les valeurs de σ_u atteignent 0,07 m/s. En comparaison, σ_u atteint 0,04 m/s pour une vitesse comprise entre 0,8 et 1 m/s (Tab. 5.1).

L'estimation du taux de turbulence à partir des données ADCP a révélé des valeurs surestimées de 20 à 30%, par rapport aux quantités respectives provenant de l'ADV. Ces résultats, similaires à l'étude de Thomson et al. (2012), soulignent les limites des ADCPs pour

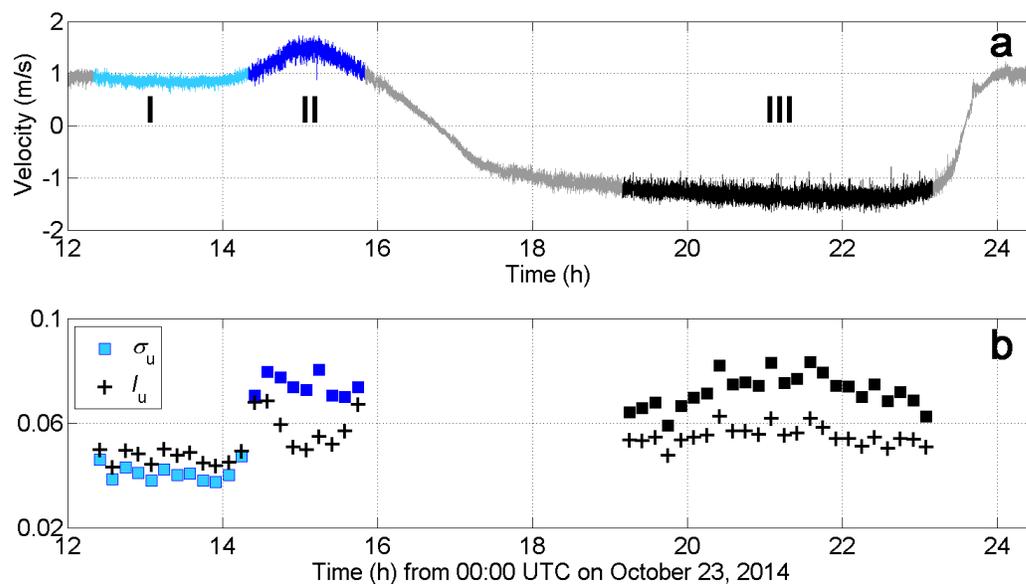


FIGURE 5.4 – (a) Vitesse de courant (composante longitudinale) enregistrée par ADV à une fréquence de 16 Hz pendant un cycle de marée le 23 octobre 2014. (b) Évolution du taux de turbulence I_u et de l'écart-type de vitesse σ_u au cours de trois périodes spécifiques du cycle de marée utilisées pour une analyse détaillée et numérotées de I à III dans (a). Le bleu clair, le bleu foncé et le noir correspondent aux variations des quantités étudiées au cours des périodes respectives.

quantifier les propriétés turbulente d'un écoulement. Ces limitations résultent d'une part de l'imprécision des mesures de vitesse (erreur instrumentale, niveau de bruit) d'autre part, de la mauvaise résolution temporelle et spatiale des instruments. La première limitation est induite par des erreurs dans la mesure du décalage Doppler, lesquelles sont généralement beaucoup plus grandes pour les ADCPs que pour les ADVs, et par un écoulement inhomogène entre les faisceaux. La deuxième limitation est la conséquence de la fréquence de l'impulsion sonore de l'instrument et de la résolution spatiale, laquelle est limitée par les dimensions minimales des « bins » et des largeurs de faisceaux.

Afin de réduire les principales limitations dans l'analyse des mesures de turbulence par ADCP, de nombreuses études ont été répertoriées au cours des vingt dernières années (e.g. [Lu et Lueck, 1999](#), [Hurther et Lemmin, 2001](#), [Thomson et al., 2012](#)). La majorité d'entre elles étaient axées sur l'amélioration de la précision de la mesure de vitesse par suppression statistique du bruit Doppler à partir de la variance de vitesse. Dans ces études, les mesures ADV ont été utilisées pour vérifier l'exactitude de la correction statistique du bruit Doppler à partir des mesures ADCP. Une autre manière proposée pour diminuer le bruit Doppler était d'augmenter le taux d'échantillonnage permettant d'établir une moyenne des impulsions sonores ([Thomson et al., 2012](#)). Cependant, le volume d'échantillonnage restant limité, une fréquence d'acquisition plus élevée ne permettrait pas une analyse à plus petite échelle. Seules des mesures ADV autorisent des observations à plus petites échelles ou avec un bruit limité.

5.3 Propriétés scalaires de l'écoulement et caractérisation multi-échelle

L'amplitude des fluctuations de vitesse (Fig. 5.4) met en évidence un niveau de turbulence ambiante variable au cours des différents stades du cycle de marée. Cette différence n'apparaît pas clairement dans les estimations d' I_u . Seul l'écart-type de vitesse révèle un

changement dans les variations locales de la turbulence, lesquelles sont liées à l'évolution de l'écoulement.

Une autre quantité généralement utilisée pour caractériser la turbulence dans un écoulement est le taux de dissipation ε . Il peut être quantifié par une analyse spectrale des séries temporelles de vitesse, en particulier dans le domaine inertiel au sein duquel l'énergie associée aux fluctuations de vitesse est liée au taux de dissipation et à la taille des tourbillons. Ces deux quantités peuvent être estimées à partir de la représentation spectrale des séries temporelles de vitesse.

La Fig. 5.5a montre la densité spectrale de puissance (DSP) de la vitesse enregistrée par ADV au cours de trois périodes successives d'un cycle de marée, dans l'après-midi du 23 octobre 2014. Les résultats sont assez similaires à ceux obtenus à partir des données ADV enregistrées en septembre 2015. Chaque sous-période, numérotée I, II et III sur le cycle de marée de la Fig. 5.4a, est de durée respective : 2 ; 1,5 et 4 heures.

Pour chaque période, trois sous-domaines fréquentiels peuvent être identifiés.

- Le premier est le domaine des basses fréquences ($f < 10^{-1}$ Hz) au sein duquel des tourbillons de grandes échelles, de taille supérieure à la profondeur totale de l'estuaire, sont générés. Ces derniers sont principalement associés aux mouvements horizontaux, lesquels transportent les tourbillons sans les déformer.
- Le deuxième domaine est le domaine inertiel, limité par 10^{-1} Hz et 3 Hz. Dans ce domaine, le transfert d'énergie entre les échelles s'effectue de façon autosimilaire et isotrope. Toute l'énergie de chaque structure est transférée aux sous-structures qu'elle engendre. Dans cette gamme fréquentielle, le spectre de puissance décroît rapidement en suivant la loi $E(f) \sim f^{-5/3}$. La densité spectrale compensée par un facteur en $f^{5/3}$ (Fig. 5.5b) permet de mieux indiquer la gamme d'échelles qui décrit cette loi de puissance. Derrière cette loi spectrale se cache l'image d'une cascade d'énergie par interactions locales en nombre d'onde, autrement dit, la décroissance rapide du spectre suggère que seuls les modes de même nombre d'onde interagissent entre eux

pour transférer de l'énergie à des nombres d'onde plus petits.

- Enfin, le dernier domaine est le domaine des hautes fréquences ($f > 3$ Hz) correspondant aux petites échelles (sous-entendues petites devant l'échelle d'injection L). Le transfert d'énergie vers ces petites échelles se réalise par un étirement de la vorticité. Ce mécanisme est responsable de fluctuations anormalement élevées : il s'agit du

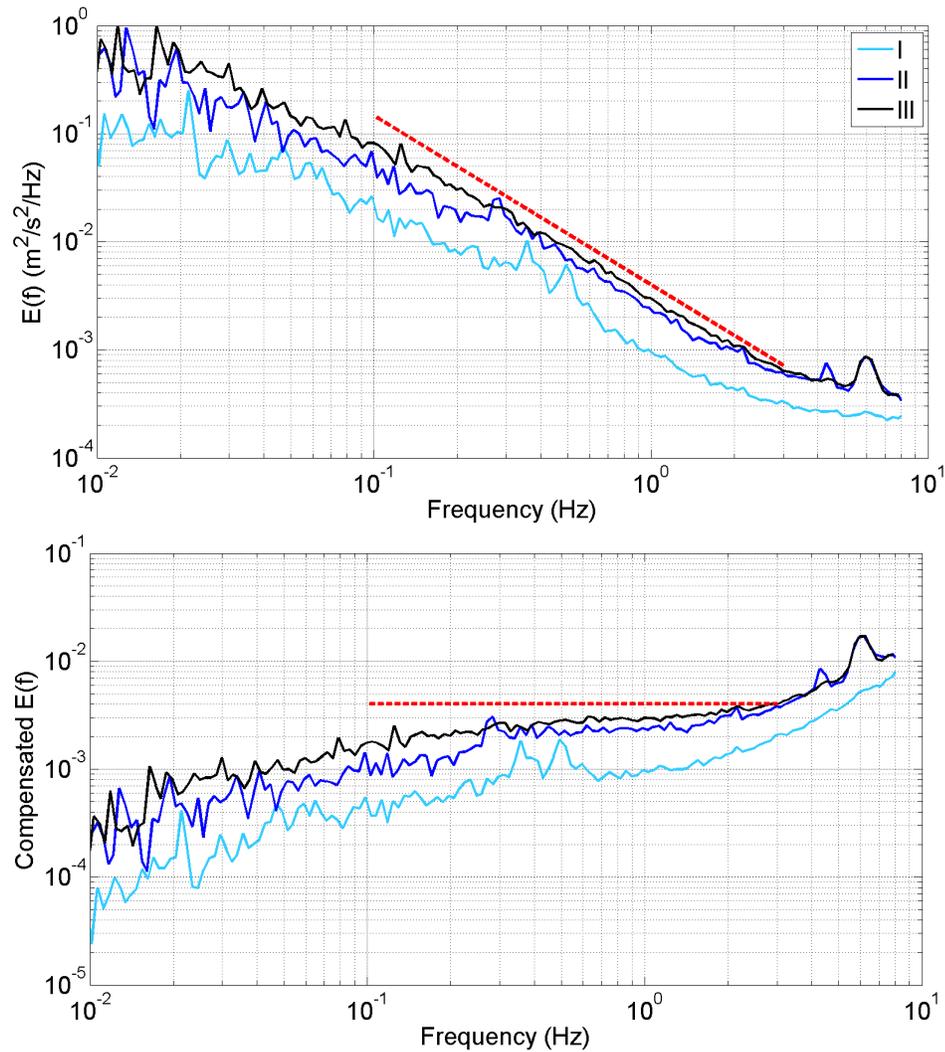


FIGURE 5.5 – Densité spectrale de puissance de la vitesse de courant (composante longitudinale) au cours de trois périodes successives d'un cycle de marée (haut) et densité spectrale compensée par un facteur en $f^{5/3}$. Chaque période est identifiée sur la Fig. 5.4 et numérotée de I à III. La ligne en pointillé rouge montre une pente spectrale de $-5/3$.

phénomène d’intermittence. À ces échelles, l’écoulement se compose d’une assemblée de structures tourbillonnantes intenses (associées à de brusques variations de vitesse) séparées par des régions où le mouvement du fluide est plus calme et désordonné (Siggia, 1981). L’intermittence fait référence à ce comportement et rend compte de la prépondérance des zones agitées par rapport aux zones calmes (Frisch et Morf, 1981). L’intermittence augmente fortement aux très petites échelles, lorsque les effets dissipatifs deviennent importants. Ce comportement peut sembler contre-intuitif dans la mesure où l’on s’attend à ce que la dissipation adoucisse les fluctuations turbulentes. Néanmoins, ceci peut s’expliquer en admettant que la dissipation n’agit pas de manière uniforme sur l’ensemble de l’écoulement. Les mouvements calmes et désordonnés sont fortement amortis, alors que la dissipation peine à « dominer les singularités » du champ de vitesse associées aux structures tourbillonnantes. Les effets dissipatifs renforcent donc le contraste entre les régions actives et les régions calmes, d’où une augmentation de l’intermittence.

En considérant le cas d’une turbulence homogène et isotrope, trois propriétés fondamentales de l’écoulement ont été quantifiées dans le domaine inertiel : le taux de dissipation ε , l’échelle d’injection L et l’échelle de Kolmogorov η . Chacune d’elle a été estimée à partir de la distribution DSP au cours des périodes I, II et III (Fig. 5.5a). Les résultats sont présentés dans le Tab. 5.2.

Les propriétés scalaires de l’écoulement ont été comparées pour différents stades de marée : le flot avec une vitesse de courant n’excédant pas 1 m/s, une phase de flot plus «

Propriétés scalaires de l’écoulement	$\varepsilon(m^2s^{-3})$	$L(m)$	$\eta(mm)$
I (flot)	$1.2 \cdot 10^{-4}$	0.6	0.4
II (flot)	$2.3 \cdot 10^{-4}$	1.6	0.3
III (jusant)	$2.4 \cdot 10^{-4}$	1.5	0.3

TAB. 5.2 – Propriétés scalaires de l’écoulement estimées au cours de trois périodes successives d’un cycle de marée dans l’Escaut.

énergétique » avec une vitesse allant de 1 à 1,5 m/s et enfin une phase de jusant énergétique avec une vitesse proche de 1,5 m/s (Fig. 5.4a).

Le taux de dissipation est de l'ordre de $10^{-4} \text{ m}^2\text{s}^{-3}$, cette valeur est en accord avec différentes études réalisées en rivière ou en milieu marin (Luznik et al., 2007, Schmitt et Huang, 2016). Néanmoins, une différence majeure a été mise en évidence entre les deux périodes successives d'évolution de la marée de flot (période I et II). La comparaison de ces deux périodes a révélé un taux de dissipation deux fois supérieur lorsque la vitesse dépasse 1 m/s. Cette valeur de vitesse représente une sorte de seuil. L'écoulement de marée de vitesse supérieure à 1 m/s présente un niveau de turbulence ambiante beaucoup plus élevé avec un changement brutal du régime turbulent. L'écart type de vitesse présenté sur la Fig. 5.4b, appuie cette observation.

L'échelle d'injection d'énergie L a également révélé une forte variation entre les différents stades de marée. Les observations ont révélé que l'énergie turbulente est injectée dans l'écoulement par les tourbillons de taille comprise entre 0,6 à 1,6 m (Tab. 5.2). Notons que cette dernière valeur est du même ordre de grandeur que le diamètre de la turbine (2 m).

Enfin, les estimations de l'échelle de Kolmogorov se sont révélées relativement stables, sans changement majeur par rapport aux régimes de l'écoulement. La plus petite taille des structures turbulentes affectées par la diffusion moléculaire est de l'ordre de 0,3 - 0,4 mm. Cette valeur est caractéristique d'un écoulement turbulent en milieu marin (e.g. Schmitt et Huang, 2016).

5.4 Estimation de la performance des prototypes d'hydroliennes

5.4.1 Hydrolienne BEC

La performance de la turbine « Blue Energy Canada » a été évaluée à partir des mesures de puissance et de vitesse de courant réalisées sur une durée de 42 heures s'étalant du 15 et 16 septembre 2015.

La Fig. 5.6 présente l'évolution temporelle de la puissance générée par la turbine et de la vitesse de courant de surface, d'une épaisseur de 2 m, enregistrée par ADCP au cours de cette période. Une anomalie dans l'enregistrement de puissance a engendré une absence de données lors du deuxième stade de jusant, entre 18h et 20h.

La puissance moyenne et maximale atteint 115 et 300 W respectivement. Globalement, l'évolution de la puissance est en accord avec la variation de la vitesse. Néanmoins, un léger décalage subsiste entre ces deux séries temporelles. La puissance mesurée en sortie de la turbine est retardée par rapport à l'enregistrement de vitesse. Ce temps de latence est d'autant plus grand que la variation de vitesse est grande. Aussi, ce retard est plus conséquent pendant la phase de flot (en rouge sur la Fig. 5.6), au cours de laquelle la vitesse croît et décroît brutalement et cela à deux reprises. Cette latence est la conséquence d'un système d'asservissement, interne à la turbine, peu ou mal optimisé.

L'objet principal d'un tel système est d'atteindre le plus rapidement possible sa valeur de consigne (ici la puissance techniquement exploitable à une valeur de vitesse donnée) et de la maintenir, quelles que soient les perturbations externes. Le principe général est de comparer la consigne et l'état du système de manière à le corriger efficacement. Or, les

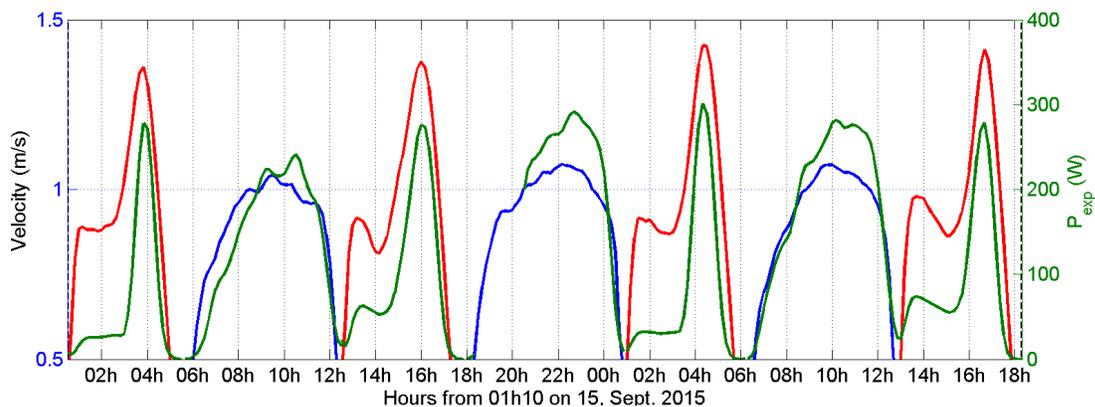


FIGURE 5.6 – Évolution temporelle de vitesse de courant dans la couche de surface, d'une épaisseur de 2 m, en flot (rouge) et en jusant (bleu) enregistrée par ADCP et de la puissance P_{exp} générée par l'hydrolienne BEC (vert), le 15 et 16 septembre 2015. Les séries de vitesse et de puissance ont été moyennées sur 10 minutes.

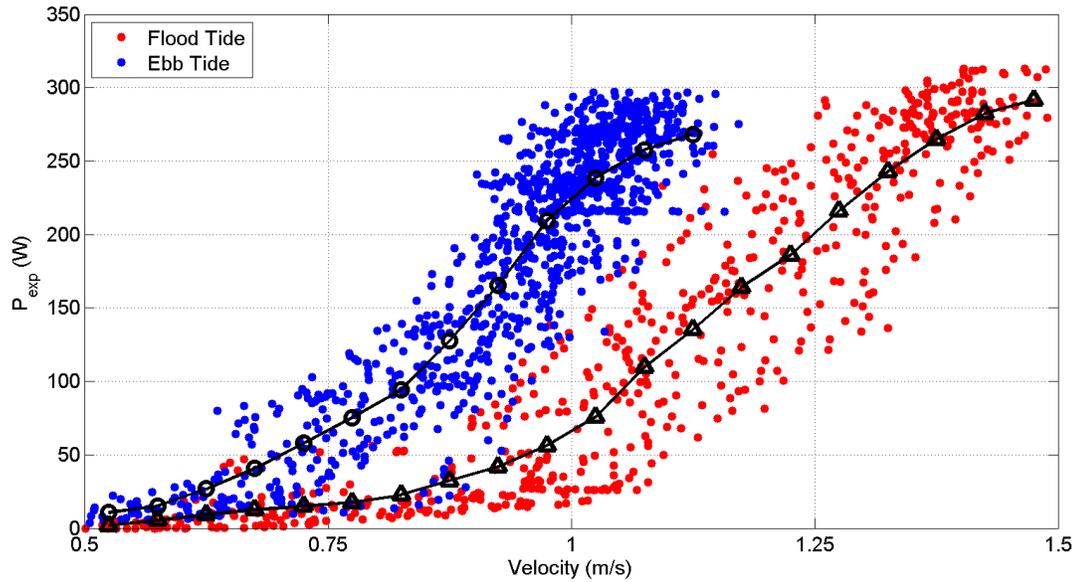


FIGURE 5.7 – Puissance P_{exp} générée par la turbine en fonction de la vitesse de courant de surface, d’une épaisseur de 2 m, en flot (points rouges) et en jusant (points bleus). Chaque point représente la moyenne sur une minute. Les courbes moyennes de puissance pour les phases de flot et de jusant sont représentées respectivement par les triangles et les cercles noirs. L’estimation de la courbe moyenne a été effectuée par intervalle de vitesse de 0,05 m/s.

fortes variations de vitesse mises en évidence pendant le flot perturbe considérablement le système d’asservissement, lequel peine à synchroniser ses valeurs de consignes aux vitesses de courant. Ce système semble plus adapté aux vitesses « homogènes » ou du moins aux variations de vitesse plus étalées dans le temps, d’où un temps de latence de moindre importance pendant le jusant (en bleu sur la Fig. 5.6).

Un asservissement défectueux détériore le rendement énergétique d’une turbine. Cet effet néfaste est mis en évidence sur la Fig. 5.7. Bien que la vitesse de courant atteigne 1,5 m/s pendant le flot, la puissance maximale générée par la turbine pour cette valeur est de l’ordre de 300 W, soit l’équivalent de la puissance maximale enregistrée pour une vitesse de 1,15 m/s pendant le jusant. Pour une même valeur de vitesse, l’écart moyen entre la puissance moyenne générée pendant le jusant est 65% supérieur à celle enregistrée pendant le flot.

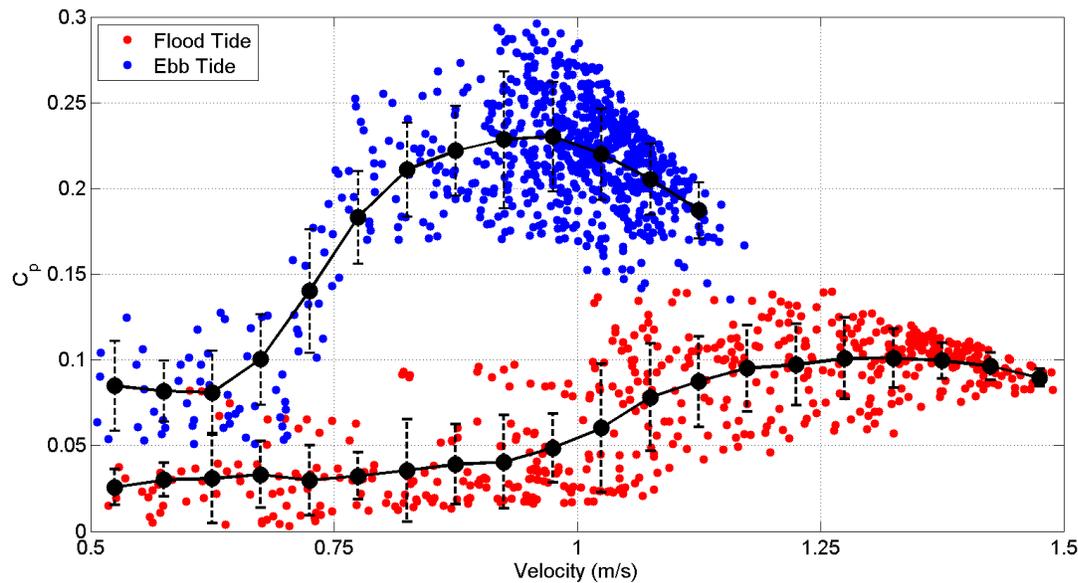


FIGURE 5.8 – Coefficient de puissance C_p estimé pour les phases de flot (points rouges) et de jusant (points bleus). Chaque point représente la moyenne sur une minute. Les points noirs représentent le C_p moyen estimé pour chaque intervalle de 0,1 m/s, en flot et en jusant respectivement, l'écart-type résultant de l'estimation des valeurs moyennes est illustré par les droites verticales, en pointillé.

Cet écart apparaît clairement sur la Fig. 5.8. Le C_p maximal estimé pendant le jusant (points bleus) atteint la valeur de 0,3 contre 0,15 pendant le flot (points rouges). En jusant, le C_p moyen maximal est de 0,23 pour une valeur de vitesse de 0,95 - 1 m/s. En flot, la valeur maximale du C_p moyen est plus de deux fois inférieure (0,1) à celle estimée en jusant et est atteinte pour une valeur de vitesse de 1,3 m/s. Le C_p moyen estimé sur toute la gamme des vitesses de flot est 3 fois inférieur à celui de jusant avec des valeurs de 0,07 et 0,21 respectivement. Ces valeurs ont été estimées avec un écart-type moyen σ_{C_p} de 0,03 pour le jusant contre 0,02 pour le flot. Il apparaît ainsi que la dispersion des données est plus importante pour la phase de jusant que celle de flot. L'écart-type maximal de 0,04 étant atteint en jusant pour la gamme de vitesse 0,95 - 1 m/s. Toutefois, pour cette phase de marée, la valeur moyenne de l'écart-type correspond à 9% du C_p moyen. Cet écart, relativement faible, atteste d'une certaine fiabilité de l'estimation du C_p en jusant. En revanche, en flot,

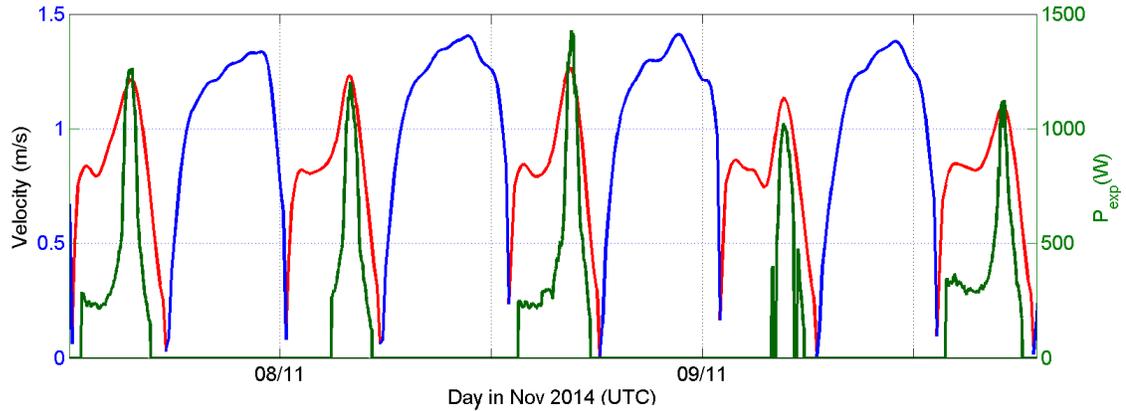


FIGURE 5.9 – Évolution temporelle de vitesse de courant de surface, d’une épaisseur de 2 m, en flot (rouge) et en jusant (bleu) enregistrée par ADCP et de la puissance P_{exp} générée par l’hydrolienne BEC (vert), les 7, 8 et 9 novembre 2014. Les séries de vitesse et de puissance ont été moyennées sur 10 minutes.

la valeur moyenne de l’écart-type correspond à 43% du C_p moyen. Cet écart est bien trop important pour tirer des conclusions précises quant à la performance de la turbine au cours de cette phase de marée.

5.4.2 Hydrolienne W2E

La performance de la turbine « Water2Energy » a été évaluée de manière similaire en utilisant les mesures de puissance et de vitesse de courant effectuées au cours d’une période de trois jours, les 7, 8 et 9 novembre 2014.

La Fig. 5.9 présente l’évolution temporelle de la puissance générée par la turbine et de la vitesse de courant de surface, d’une épaisseur de 2 m, enregistrée par ADCP. Les signaux de puissance et de vitesse sont en phases. La puissance maximale atteint 1 400 W lors de l’enregistrement réalisé l’après-midi du 8 novembre. La puissance moyenne générée par la turbine lors des périodes de fonctionnement est de l’ordre de 500 W.

Le coefficient de puissance moyen $\overline{C_p}$, estimé sur toute la gamme de vitesse (0,6 - 1,3 m/s) est de l’ordre de 0,35 (Fig. 5.10). La performance optimale est atteinte pour les vitesses proches de 1,2 m/s avec un C_p de 0,42 soit 71% de la performance théorique la plus élevée

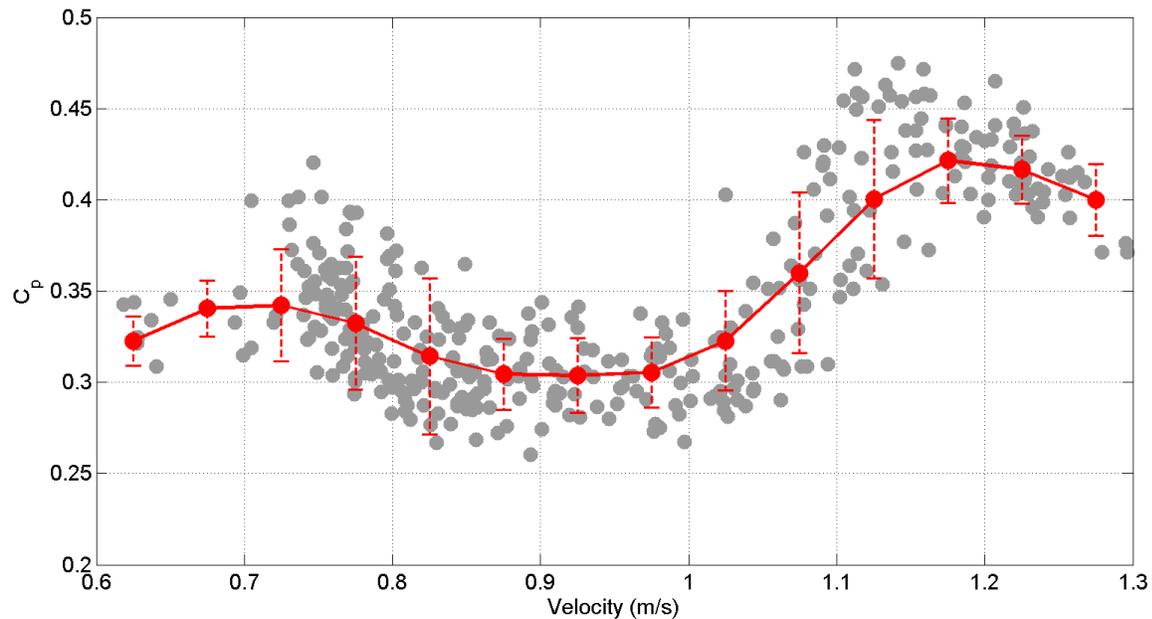


FIGURE 5.10 – Puissance P_{exp} générée par la turbine en fonction de la vitesse de courant mesurée par ADCP et moyennée dans une épaisseur de 2 m sous la surface. Chaque point représente la moyenne sur une minute. La courbe rouge représente l'évolution moyenne de la distribution, estimée par intervalle de 0,05 m/s. L'écart-type σ_{C_p} résultant de l'estimation des valeurs moyennes est illustré par les droites verticales, en pointillé.

(limite de Betz). Pour les vitesses inférieures, comprises entre 0,85 - 1 m/s, la performance diminue à 0,30. Un C_p légèrement plus élevé (0,33) est observé pour des vitesses encore plus faibles (0,6 - 0,85 m/s) avec néanmoins une forte dispersion du nuage de points pour cette gamme de vitesses. Les valeurs de C_p , moyennées par pas successifs de 0,05, ont été estimées avec un écart-type moyen de 0,03 m/s soit 8% du $\overline{C_p}$. À noter que l'écart-type maximal, de l'ordre de 0,05 m/s est atteint pour les vitesses de 1,05 m/s.

Une autre manière d'étudier la performance d'une hydrolienne consiste à tracer l'évolution du coefficient de puissance C_p en fonction de la vitesse spécifique λ (section 4.5). La Fig. 5.11 illustre cette analyse. La vitesse spécifique évolue dans une gamme faiblement étendue : de 2 à 3,8. Le C_p maximal est atteint pour un λ de 3,6. La valeur de l'écart-type moyen est du même ordre de grandeur ($\sigma_{C_p} \sim 0,03$) que l'étude présentée sur la Fig. 5.10. Pour chacune de ces deux analyses, la dispersion du nuage de points est la conséquence,

d'une part, des variations du couple exercé par l'écoulement sur la turbine, d'autre part, d'un système d'angle de calage des pales mal optimisé, en particulier pour les vitesses de l'ordre de 1 m/s ou d'un λ d'environ 3,4.

Enfin, la courbe de puissance (Fig. 5.12) montre une augmentation progressive (linéaire) pour des valeurs de vitesse comprises entre 0,6 et 1,05 m/s. Une croissance considérable de la production d'énergie est observée pour des vitesses plus importantes. La courbe, obtenue sur la base d'une moyenne sur une minute, apparaît assez lisse et contient très peu de valeurs aberrantes. Cette courbe peut être utilisée pour estimer la production de puissance pour différentes conditions de marée sur d'autres sites d'énergie marine.

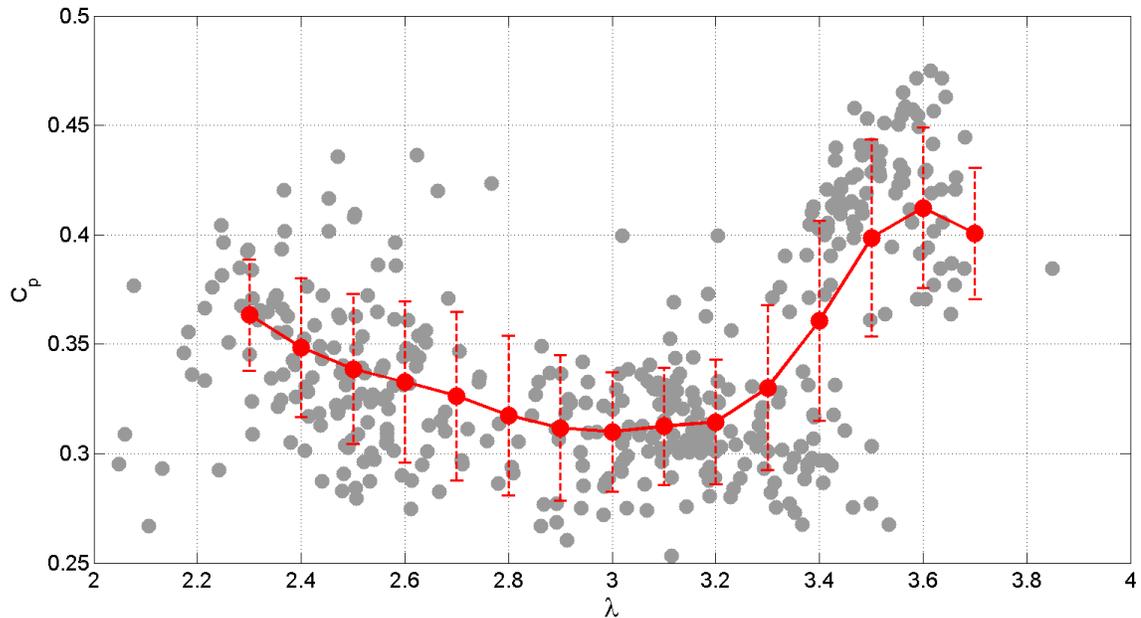


FIGURE 5.11 – Puissance P_{exp} générée par la turbine en fonction de la vitesse spécifique λ . Chaque point représente la moyenne sur une minute. La courbe rouge représente l'évolution moyenne de la distribution, estimée par intervalle de 0,1 λ . L'écart-type σ_{C_p} résultant de l'estimation des valeurs moyennes est illustré par les droites verticales, en pointillé.

5.5 Analyse de la production de puissance et mise en relation avec la turbulence

Bien que la performance de la turbine atteigne sa valeur optimale pour les vitesses de courant supérieures à 1,1 m/s, la production de puissance souffre d'un manque de stabilité et devient fortement intermittente. La Fig. 5.13a met en évidence cette intermittence et révèle des fluctuations de puissance plus élevées pour cette gamme de vitesse. Cette forte variabilité de puissance résulte des variations du couple, conséquence du caractère turbulent de l'écoulement, lequel exerce une charge très irrégulière sur les pales.

L'étude d'un éventuel lien entre la réponse instantanée de la turbine et la turbulence présente dans l'écoulement incident nécessite une analyse conjointe des propriétés scalaires de l'écoulement et de la puissance générée par la turbine.

La Fig. 5.14 montre la densité spectrale de puissance de la série temporelle de puissance de sortie enregistrée à une fréquence d'acquisition de 100 Hz, le 7 novembre 2014

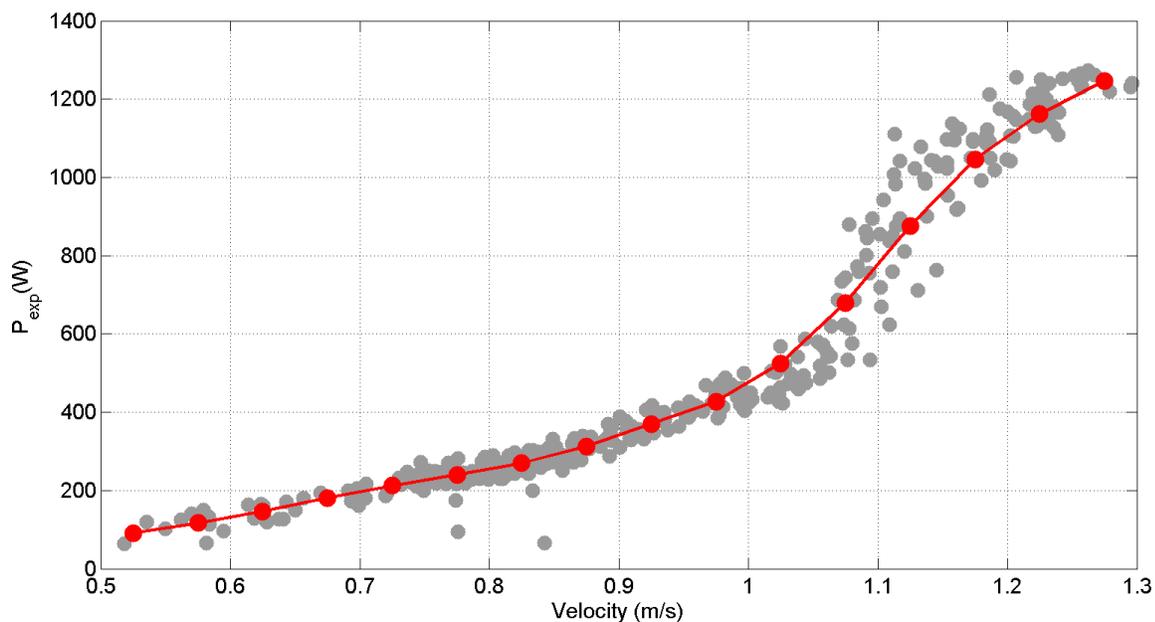


FIGURE 5.12 – Courbe de puissance du prototype d'hydrolienne de la société W2E.

lors d'un essai de 3 heures de la turbine W2E. Trois zones caractéristiques sont identifiées dans le spectre de puissance P_{exp} . Dans le domaine des basses fréquences ($f < 4 \cdot 10^{-2}$ Hz), les fluctuations de puissance semblent découplées des fluctuations de vitesse (Fig. 5.5a). La courbe spectrale, relative à la puissance générée, tend à s'aplatir et présente de fortes variations de DSP.

Dans le domaine inertiel ($4 \cdot 10^{-2}$ Hz $< f < 4$ Hz), la puissance générée par la turbine semble être conditionnée par la cascade d'énergie turbulente qui régit l'écoulement de marée dans cette gamme fréquentielle. La DSP de la puissance générée montre un comportement similaire à celui observé pour la vitesse de l'écoulement incident (Fig. 5.5a et Fig. 5.14). Pour ces deux quantités, le coefficient directeur de la DSP est très proche de $-5/3$: $-1,44$ pour la vitesse et $-1,32$ pour la puissance.

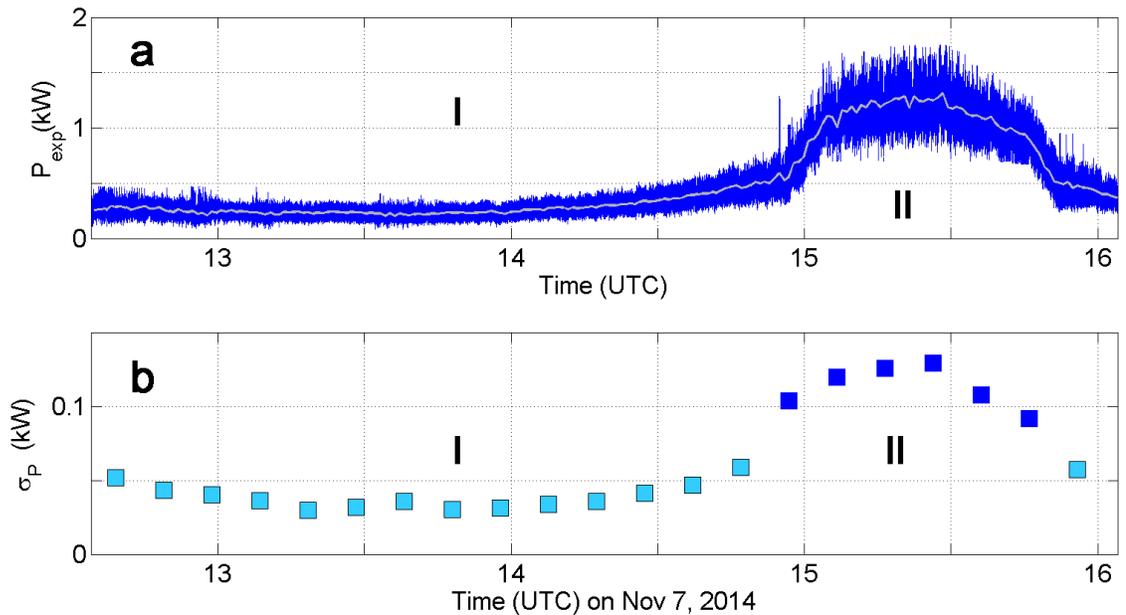


FIGURE 5.13 – (a) Puissance générée par la turbine W2E lors du test effectué le 7 novembre 2014. La couleur bleu désigne l'évolution temporelle de la puissance enregistrée à une fréquence d'acquisition de 100 Hz. La puissance moyennée sur une minute est représentée en gris. (b) Écart-types des fluctuations de puissance estimés par intervalles de 10 minutes. Les périodes de vitesse modérée et élevée sont identifiées par les chiffres I et II, et délimitées par les couleurs bleu clair et bleu foncé.

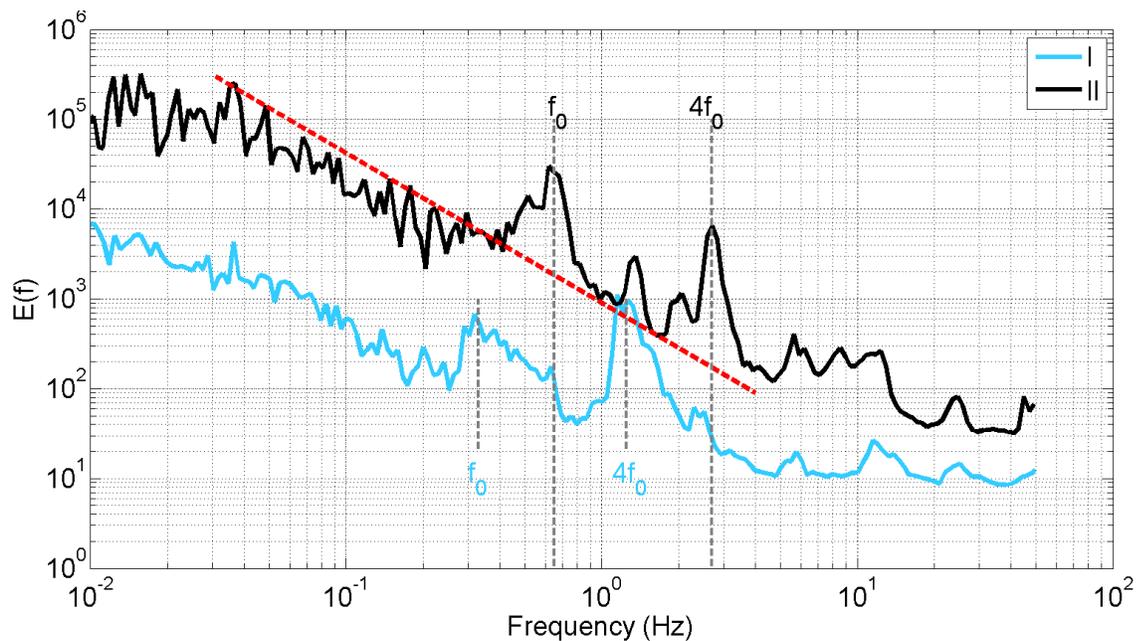


FIGURE 5.14 – DSP de la puissance générée par la turbine le 7 novembre 2014, au cours de deux périodes de flot identifiées sur la Fig. 5.13 et numérotées I et II. La ligne rouge montre la pente spectrale $f^{-5/3}$. La fréquence moyenne de rotation des pales de l’hydrolienne est donnée par f_0 pour chaque période.

Dans le domaine $f > 4.10^{-1}$ Hz, la forme du spectre pour la puissance est largement déformée et révèle que les fluctuations de puissance sont globalement centrées sur deux fréquences $f_0 = 6.10^{-1}$ Hz et $4f_0$, où f_0 désigne la fréquence de rotation des pales de l’hydrolienne. L’harmonique supérieure, $4f_0$, révèle une forte interaction de chacune des quatre pales de la turbine avec l’écoulement incident. Les deux fréquences se situent dans le domaine inertiel, là où la turbine est supposée interagir de manière « active » avec l’écoulement turbulent. De tels pics de fréquence ont également été mis en évidence lors de la détermination du spectre de la force de traînée au cours d’une étude effectuée dans le cas d’un écoulement turbulent dans un canal de faible profondeur (Fernandez-Rodriguez et al., 2014) ou encore lors d’une étude de corrélation entre vitesse de l’écoulement et puissance générée par une d’hydrolienne installée en bassin d’essai (Durán Medina et al., 2017).

Dans le domaine des hautes fréquences ($f > 4$ Hz), les fluctuations de puissance

semblent être insensibles aux mouvements turbulents. Au-dessus de la fréquence critique $f_c = 4$ Hz, les enregistrements de puissance et de vitesse sont clairement affectés par le bruit rendant impossible toute interprétation des fluctuations de ces deux quantités dans ce domaine fréquentiel. Par ailleurs, le coefficient directeur (négatif) de la DSP générée pendant la période I (puissance faible) est supérieur à celui estimé pour la période II (puissance élevée) avec des valeurs respectives de -0,98 et -1,32. Ceci justifiant la tendance à l'aplatissement de la première courbe par rapport à la deuxième.

La comparaison des spectres de puissance générée au cours des périodes I et II, lesquelles correspondent à des périodes de vitesse faible (0,8 - 1 m/s) et élevée (> 1 m/s), révèle une grande différence dans l'amplitude des fluctuations de puissance. La Fig. 5.14 révèle un écart de plus d'une décade entre les deux courbes DSP. La variabilité de la puissance peut être quantifiée en estimant l'écart-type σ_P des fluctuations de puissance pour chacune des périodes spécifiques. La Fig. 5.13b montre que l'écart-type de la puissance de sortie augmente de plus de deux fois (de 0,05 à 0,12 kW) au cours de la deuxième période de fonctionnement de la turbine. Les deux représentations (spectrales et statistiques) mettent en évidence une relation étroite entre la variabilité de puissance et la turbulence dans l'écoulement dans le domaine inertiel (Fig. 5.4, 5.5a et Fig. 5.13, 5.14).

L'estimation des propriétés scalaires de l'écoulement (Tab. 5.2) montre que le taux de dissipation est deux fois plus élevé au cours de la période II. En outre, la taille des tourbillons turbulents dans l'écoulement augmente considérablement entre les deux périodes (jusqu'à 1,6 m) et devient comparable au diamètre de la turbine (2 m).

Ce résultat fournit des informations cruciales quant au comportement de la turbine en réponse aux régimes d'écoulement variable et en particulier au niveau de turbulence ambiante présente dans l'écoulement. Dans l'écoulement de marée observé sur notre site d'étude, l'énergie cinétique turbulente est transférée de façon conservative sous forme de cascade à partir des tourbillons de plus grandes tailles, correspondant à l'échelle d'injection $L = 1,6$ m (pour les vitesses supérieures à 1 m/s), jusqu'aux tourbillons de tailles inférieures

de l'ordre du millimètre (η) avant de se dissiper sous forme de chaleur par diffusion moléculaire. Les tourbillons de grande taille exercent des charges périodiques plus importantes sur les pales, affectant fortement le couple et provoquant des pulsations de puissance de grandes amplitudes. La distribution de la DSP montre une augmentation de l'amplitude de plus d'une décade, correspondant à deux fréquences f_0 et $4f_0$ (Fig. 5.14).

En conditions réelles de marée, la turbulence est le principal facteur responsable de l'intermittence de la production d'électricité d'une hydrolienne. Le taux de turbulence I , utilisé par les ingénieurs pour quantifier le niveau de turbulence ambiante demeure une quantité qui, en général, ne peut permettre à elle seule de révéler les changements quantitatifs du régime turbulent lorsque la vitesse augmente (de 0,2 à 1,1 m/s dans notre étude). D'autres quantités, tels que le taux de dissipation ε , l'échelle d'injection d'énergie L , ou encore l'écart-type de vitesse σ semblent plus appropriées pour la caractérisation de la turbulence.

Au cours de la période II, un niveau plus élevé de turbulence ambiante provoque une plus forte variabilité de la production de puissance en exerçant des charges sur les pales qui, à leur tour, engendrent de fortes variations du couple. La représentation spectrale de la variabilité de la puissance et de la vitesse de l'écoulement montre un comportement similaire dans le domaine inertiel (pente de -1,32 et -1,44 pour les quantités respectives). Il semblerait qu'ici, les variations de puissance soient causées par des tourbillons turbulents de taille comparable à la taille de la turbine.

Enfin, une analyse du degré de cohérence des séries temporelles de vitesse du rotor et de puissance a été menée. Pour cela, la distribution spectrale de la fonction de cohérence γ_{xy} a été établie (Fig. 5.15), x et y étant respectivement la vitesse du rotor et la puissance générée par l'hydrolienne.

Globalement, γ_{xy}^2 est inférieure à 1 sur l'ensemble du domaine fréquentiel révélant la non-linéarité des deux signaux temporels. D'autre part, le comportement de la fonction de cohérence à travers les différents domaines fréquentiels est très inhomogène. Trois domaines

sont clairement identifiables. Le premier concerne les basses fréquences ($f < 5 \cdot 10^{-3}$ Hz) où la valeur de γ_{xy}^2 est proche de 0,9 révélant une relation vitesse/puissance générée, quasiment linéaire. Le deuxième domaine est délimité du premier par une chute brutale de γ_{xy}^2 , laquelle atteint 0,15 à la fréquence $f \sim 10^{-2}$ Hz. Le deuxième domaine s'étant jusqu'à la fréquence $f \sim 10^{-1}$ Hz. Le comportement de la fonction de cohérence dans l'ensemble de cette gamme fréquentielle est marqué par de multiples fluctuations avec des valeurs maximales de γ_{xy}^2 de l'ordre de 0,5. La diminution de la cohérence dans cet intervalle de fréquence se justifie par la présence d'un bruit non corrélé dans les mesures. Celui-ci représente aussi bien la non-linéarité qui existe entre la puissance de sortie et la vitesse du rotor que les éventuelles autres sources d'excitation provenant de l'équipement électronique de la turbine.

Le dernier domaine fréquentiel concerne les hautes fréquences ($f > 10^{-1}$ Hz). Ici, les valeurs de γ_{xy}^2 restent globalement inférieures à 0,2. Les signaux de vitesse du rotor et de puissance sont quasiment décorrélés. Ce domaine fréquentiel est marqué par l'apparition de signaux parasites qui viennent se superposer au signal dit utile (i.e l'information que l'on

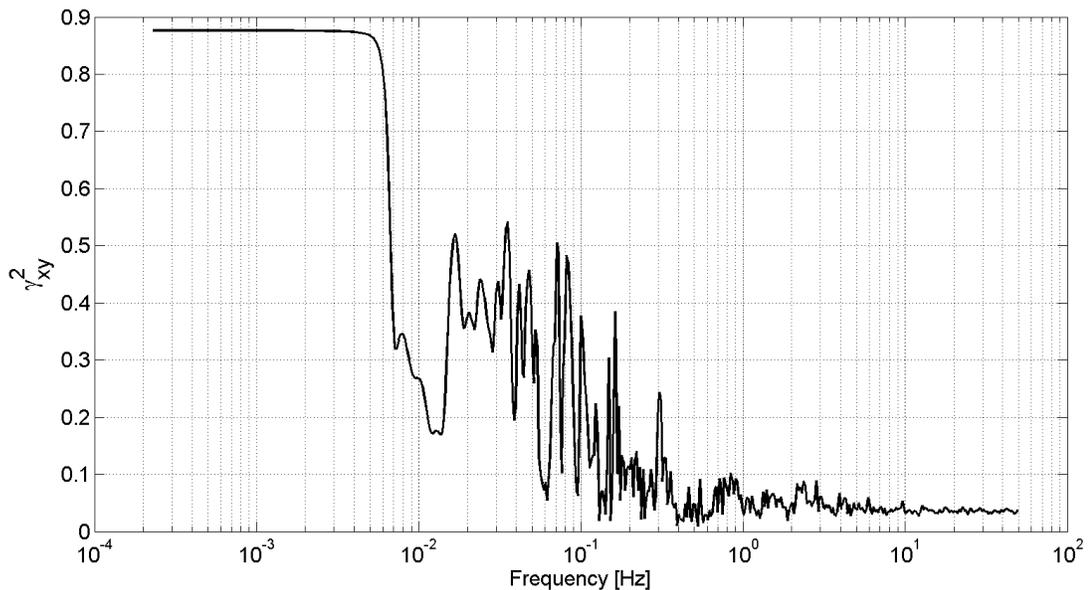


FIGURE 5.15 – Spectre de cohérence entre la vitesse du rotor et la puissance générée par la turbine. Chaque quantité a été enregistrée à une fréquence d'acquisition de 100 Hz.

souhaite récupérer). Par ailleurs, la puissance mesurée en sortie est sujette à des fluctuations spontanées. Ces variations sont à l'origine du bruit de mesure que l'on observe sous forme de bruit de fond et de perturbations impulsionnelles. Ce phénomène constitue une limitation pour la transmission d'informations sous la forme de signaux électriques.

5.6 Conclusions

Deux prototypes d'hydroliennes de la société néerlandaise « W2E » et canadienne « Blue Energy » ont été déployées dans l'Escaut. Les mesures de vitesse de courant ont été réalisées par ADCP et ADV au cours des essais de chacune des turbines. Les mesures de vitesse ont permis : (1), d'évaluer la performance de chaque système de récupération ; (2) : d'estimer les paramètres turbulents de l'écoulement sur le site expérimental ; (3) : de quantifier les effets de la turbulence sur la puissance de sortie.

Dans une perspective de réduction des coûts de maintenance et de réparation, la quantification précise des paramètres turbulents demeure fondamentale pour la compréhension des facteurs principaux qui agissent sur l'intégrité structurelle et la fiabilité des hydroliennes. Parmi ces facteurs, la fatigue est généralement considérée comme étant le critère essentiel de dimensionnement des récupérateurs d'énergie tidale. Celle-ci peut être considérée comme la capacité de la machine à endurer des charges cycliques sur de longues périodes. La turbulence génère des contraintes sur la structure de l'hydrolienne, variable temporellement, dont l'impact sur l'intégrité physique du récupérateur est plus néfaste que celui généré par des charges constantes ([Thomson et al., 2012](#)).

Dans l'industrie éolienne, la fatigue est quantifiée à l'aide du calcul du moment à dommage équivalent (« damage equivalent loads - DEL »), lequel est évalué pour chaque composant de la turbine et des fondations ([Frandsen, 2007](#)). Le DEL représente la charge constante équivalente aux charges variables dans le temps sur un nombre de cycles standard (10 cycles à 1 Hz, pour le vent). Un DEL élevé suggère qu'un matériau se détériorera pré-

maturément, aussi le calcul du DEL s'avère nécessaire à la sélection d'une turbine dont les composants sont de résistances suffisantes pour supporter les conditions environnementales du site d'exploitation. L'estimation des DEL nécessite de simuler l'historique des contraintes qui s'applique sur un composant matériel. Pour ce faire, l'utilisation d'un modèle aéroélastique est généralement privilégié. Pour une meilleure précision des prévisions, les paramètres turbulents, préalablement mesurés sur le site d'exploitation, sont intégrés au modèle (Frandsen, 2007).

Dans le cas des récupérateurs d'énergie tidale, les modèles hydroélastiques nécessaires à la simulation de l'historique des contraintes sont encore en développement. L'incorporation des valeurs de l'ensemble des paramètres turbulents présentés dans ce chapitre, aux futurs modèles hydroélastiques constitueront un apport qualitatif certain en optimisant la prévision des contraintes par modélisation numérique.

En utilisant le spectre de puissance des séries temporelles des vitesses enregistrées par ADV, trois échelles dynamiques de la turbulence ont été identifiées. La première, dite de grande échelle, est associée aux mouvements horizontaux de basses fréquences ($f < 10^{-1}$ Hz) qui transportent les grands tourbillons sans les détruire. La deuxième échelle dynamique de la turbulence opère dans le domaine inertiel (10^{-1} Hz $< f < 3$ Hz), dans lequel la dynamique du fluide réalise une cascade (conservative) d'énergie des grandes vers les petites échelles. Ces petites échelles abritent la dernière dynamique de la turbulence identifiée dans cette analyse. Ici, les mouvements, de hautes fréquences ($f > 3$ Hz), sont plus rapides et la vitesse de l'écoulement est sujette à de fortes fluctuations responsables du phénomène d'intermittence des vitesses de courant.

Bien qu'approximatif, ce partitionnement en échelles dynamiques de la turbulence s'avère essentiel à la détermination des échelles critiques, susceptibles d'altérer la performance, le bon fonctionnement ainsi que l'intégrité physique de la turbine. En particulier, les travaux présentés dans ce chapitre ont démontré que la turbine répond plus activement à la turbulence sur des échelles semblables au diamètre du rotor (2 m).

La prise en compte de l'ensemble de ces résultats peut contribuer à la réduction des DEL et améliorer ainsi la viabilité économique des projets de récupération d'énergie tidale.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Sur l'estimation du potentiel hydrocinétique par télédétection des courants et mesures *in situ*

Avec le deuxième potentiel énergétique européen d'origine tidale, la France dispose d'une ressource hydrocinétique non négligeable. En diversifiant le mix énergétique, celle-ci peut contribuer à renforcer l'indépendance énergétique du territoire français, lutter contre le réchauffement climatique et baisser la facture énergétique. Toutefois, en dépit de son potentiel prometteur, l'exploitation de l'énergie d'origine tidale accuse toujours un sérieux retard par rapport à d'autres ressources renouvelables, notamment le solaire et l'éolien. Bien que les projets de récupération d'énergie tidale se multiplient, l'absence d'une méthodologie pertinente de quantification du potentiel a longtemps fait défaut au développement de la technologie hydrolienne. La mise au point d'une telle méthodologie a constitué l'objectif de la première partie de cette thèse.

Bien que privilégiée pour l'estimation du potentiel hydrocinétique, la modélisation numérique n'en demeure pas moins un outil aux résultats contestables. Le recours à une conceptualisation volontairement simpliste des phénomènes réels ne peut lui permettre de fournir des résultats absolus. La connaissance des conditions hydrodynamiques d'un site EMR nécessite l'acquisition et l'interprétation de mesures des courants marins permettant ainsi d'intégrer la complexité de la réalité spécifique au site. L'originalité des résultats présentés dans la première partie de cette thèse réside dans l'utilisation conjointe de systèmes de mesure de courant par radars et ADCPs pour l'estimation du potentiel d'énergie tidale.

Deux radars HF déployés sur les côtes bretonnes depuis 2006 ainsi que le déploiement de deux radars VHF sur les côtes du détroit du Pas-de-Calais au printemps 2003, ont permis d'obtenir des mesures de courant de surface inédites avec des résolutions et des durées permettant de décrire complètement la circulation côtière dont les échelles de variabilité typiques sont de l'ordre d'une heure à une année et d'un à plus de cent kilomètres. L'ensemble des paramètres de l'écoulement de marée (vitesse moyenne et maximale, asymétrie

des vitesses et de direction de courant, densité de puissance cinétique) ont pu être quantifiés. En complément des données radars, les profils verticaux de vitesse obtenus par ADCP ont été établis, permettant de quantifier la ressource hydrocinétique en trois dimensions.

Les secteurs les plus énergétiques de chaque région ont été identifiés. En mer d'Iroise, les courants les plus forts ont été observés au centre du passage du Fromveur et dans une zone au nord-ouest de l'île d'Ouessant. Dans ces deux zones, la vitesse moyenne et maximale de courant atteint 1,5 et 4 m/s respectivement. Un écart significatif de la direction du courant de flot et de jusant a été observé au sud et à l'est de l'île d'Ouessant. Dans ces deux secteurs, l'asymétrie de direction $\Delta\theta$ est supérieure à 40° avec une valeur maximale de 90° à l'extrémité sud de l'île. La présence de tourbillons transitoires dans ce secteur explique de telles valeurs de $\Delta\theta$. Dans le passage du Fromveur, un changement radical dans l'amplitude des courants de flot et de jusant a été mis en évidence. À l'extrémité nord du passage, l'asymétrie a des vitesses de courant est de 2,5 contre 0,5 à l'extrémité sud.

Dans le détroit du Pas-de-Calais, le secteur le plus énergétique a été localisé à 6 km au large du Cap Gris-Nez. L'asymétrie de direction varie de 2° à 10° sur la totalité du domaine d'étude avec des valeurs maximales atteintes à proximité du Cap Gris-Nez. Ici, l'asymétrie des vitesses de courant atteint la valeur maximale de 1,6.

Les données récoltées par radars et ADCPs ainsi que la méthode de quantification ont prouvé leur efficacité dans l'estimation du potentiel hydrocinétique d'un site EMR. En guise de perspective, le couplage de systèmes radars à la modélisation numérique permettra de reconstituer les profils verticaux de courant en chaque point de la grille régulière. Ceci permettra de s'affranchir de l'hypothèse forte, notamment utilisée pour l'étude dans le détroit du Pas-de-Calais, qui suppose que l'évolution de la vitesse selon la verticale, déterminée par ADCP, est la même dans tout le domaine d'étude. Cette hypothèse constitue d'ailleurs le principal défaut de la méthodologie proposée dans cette thèse.

Cette association observations/modélisations constitue l'originalité du projet HYD2M financé par l'Agence National de la Recherche visant à étudier les propriétés hydrodynam-

miques du Raz Blanchard. Le couplage de ces deux outils contribuera à fiabiliser la prévision de la ressource hydrocinétique dans un environnement physique très complexe, abritant l'un des potentiels le plus élevé au monde.

Sur l'étude de la circulation de marée sur deux sites au sud de l'Angleterre

Le Royaume-Uni dispose du potentiel d'énergie tidale le plus important d'Europe. Avec la mise en place de solides programmes R&D et des équipements à la pointe de la technologie, les britanniques ont conforté leur place de leader européen en la matière. Bien qu'impliqué dans de nombreux projets de grandes envergures, le Royaume-Uni n'en néglige pas moins les projets de plus petites échelles. Ces derniers permettront à terme une production d'énergie décentralisée et favoriseront l'auto suffisance énergétique de certaines zones isolées.

En tant que région insulaire, l'Ile de Wight entre parfaitement dans cette catégorie. Déterminées à atteindre l'objectif d'indépendance énergétique à l'horizon 2025, les autorités de l'Ile de Wight ont clairement affiché leur volonté quant au développement de la technologie hydrolienne le long de leurs côtes. Bien que le site de Perpetuus ait été privilégié pour l'installation de récupérateurs d'énergie tidale, d'autres sites sont toujours considérés comme étant susceptibles d'accueillir cette technologie. Le site au large du port de Yarmouth fait notamment partie de ces candidats. Motivé par les mêmes enjeux d'indépendance énergétique, les autorités portuaires de Douvres ont également manifesté leur intérêt quant à l'exploitation de l'énergie des courants de marée.

Par l'intermédiaire du projet Pro-Tide, le LOG s'est vu proposer d'apporter son expertise dans la mesure des courants afin de fournir une première évaluation de la circulation de marée au large du port de Douvres et de Yarmouth. Les mesures ont été effectuées au moyen d'un dispositif innovant d'ADCP tracté. Le traitement des mesures a permis d'établir des

cartes très détaillées des zones investiguées.

L'étude menée sur chaque site a permis de révéler une zone potentielle d'exploitation des courants de marée. Une telle zone a été mise en évidence dans le secteur sud-ouest sur le site de Yarmouth et à environ 500 m au sud de la digue centrale sur le site de Douvres. Néanmoins, ce type d'étude est insuffisant pour la caractérisation du potentiel hydrocinétique. Elle constitue en réalité la première étape dans l'estimation du potentiel. Le recours à un modèle numérique peut être envisagé comme l'étape ultérieure. Les mesures ADCP trouveront une application dans la validation des résultats du modèle et permettront d'améliorer les performances. L'emploi d'un modèle permettra de déterminer avec précision l'emplacement du site idéal à l'implantation d'hydrolienne(s). Les résultats pourront être étayés par le déploiement, sur le site sélectionné, d'un ADCP fixe, installé sur le fond. Cette étape finale permettra de déterminer les paramètres pertinents de quantification d'énergie et d'en évaluer les variations temporelles.

Sur l'étude d'impact de la turbulence sur la performance énergétique de systèmes de récupération d'énergie tidale

Bien qu'aujourd'hui suffisamment mature pour envisager un développement à l'échelle commerciale, la technologie hydrolienne est encore sujette à de fortes incertitudes quant à la viabilité économique des projets de récupération d'énergie tidale. Mise à mal par le milieu marin, jugé hostile, la longévité des machines demeurent fortement compromise. La sous-estimation des contraintes hydrodynamiques qui s'appliquent sur la structure des hydroliennes, notamment sur les pales et la méconnaissance des phénomènes turbulents qui règnent dans leur milieu de fonctionnement (environnement côtier, milieu estuarien) constituent de sérieux obstacles à la préservation de l'intégrité physique des récupérateurs.

Pour affiner la quantification de la turbulence et des contraintes hydrodynamiques et prévenir les défaillances, il est nécessaire d'élaborer des stratégies pertinentes et efficaces

visant à estimer les paramètres turbulents de l'écoulement. Celles-ci doivent permettre d'établir les ordres de grandeurs des phénomènes turbulents.

Dans le cadre du projet Pro-Tide, une étude d'impact de la turbulence sur l'efficacité de fonctionnement de deux prototypes d'hydroliennes a été menée dans l'Escaut, en Belgique. Les mesures de vitesse de courant, réalisées par ADCP et ADV au cours des essais de chacune des turbines ont permis d'évaluer la performance des systèmes de récupération, d'estimer les paramètres turbulents de l'écoulement sur le site expérimental et de quantifier les effets de la turbulence sur la génération de puissance. En utilisant le spectre de puissance des séries temporelles de vitesse, les échelles critiques de la turbulence ont été identifiées. Les travaux présentés dans cette seconde partie de thèse ont démontré que la turbine (W2E) répond à la turbulence sur des échelles semblables au diamètre du rotor (2 m). Des résultats similaires ont notamment été mis en évidence lors d'essais expérimentaux d'un prototype d'hydrolienne tripales réalisés dans le bassin de houle et courant de l'Ifremer de Boulogne/mer ([Durán Medina et al., 2017](#)).

Les hydroliennes testées opérant dans la couche de surface, l'installation d'appareils de mesures de vitesse de courant dans leur sillage était facilitée. Néanmoins les résultats obtenus doivent être comparés à ceux d'autres campagnes de tests, notamment pour des systèmes de récupération de plus grandes tailles et opérant à mi-hauteur dans la colonne d'eau. Pour ce type de test, le déploiement d'un ADV au niveau de moyeu de l'hydrolienne (~ 10 m au-dessus du fond marin) n'est pas chose aisée. Un ADCP installé sur le fond marin pourrait convenir, or nous avons mis en évidence les limites de ce type d'appareil dans la caractérisation de la turbulence. Aussi, une amélioration future consisterait à l'utilisation d'un instrument hybride, utilisant des faisceaux convergents et des impulsions cohérentes (en tant qu'ADV) à plus grande échelle (en tant qu'ADCP) pour effectuer des mesures de vitesse de précision à la hauteur du moyeu à partir d'une plate-forme installée sur le fond.

Enfin, même si les phénomènes turbulents abordés dans cette thèse s'inscrivent dans le cadre d'une turbulence pleinement développée, ces derniers ne sont pas les seuls processus

susceptibles d'appliquer des contraintes sur les structures des hydroliennes. Les recherches menées dans le secteur éolien ont montré que les structures tourbillonnaires cohérentes sont celles qui appliquent les contraintes les plus élevées (Kelley et al., 2000, 2005). Ces structures sont essentiellement engendrées par d'intenses gradients verticaux de cisaillements lesquels créent des flux résonnants d'énergie vibratoire. Cette énergie est ensuite propagée dans le reste de la structure, où elle se dissipe localement. Aussi, l'utilisation d'un réseau d'instruments multiples pour la quantification de ces structures cohérentes est une perspective évidente quant aux futures études d'impact de la turbulence sur la performance des systèmes de récupération d'énergie tidale.

BIBLIOGRAPHIE

- Abommel C. et Achard J. L. *Énergies renouvelables marines Étude de cas : l'hydrolien*. Technical report, EDF–Production Ingénierie Hydraulique, 2009.
- Ahmed H. B., Multon B., et Thiaux Y. *Consommation d'énergie, ressources énergétiques et place de l'électricité*. Techniques de l'ingénieur, Paris, France., 2011.
- Antonio F. d. O. Wave energy utilization : A review of the technologies. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(3) :899–918, 2010.
- Ardhuin F., Marié L., Rasclé N., Forget P., et Roland A. Observation and estimation of Lagrangian, Stokes, and Eulerian currents induced by wind and waves at the sea surface. *Journal of Physical Oceanography*, 39(11) :2820–2838, 2009.
- Babarit A., Ahmed H. B., Clément A. H., Debusschere V., Duclos G., Multon B., et Robin G. Simulation of electricity supply of an Atlantic island by offshore wind turbines and wave energy converters associated with a medium scale local energy storage. *Renewable Energy*, 31(2) :153–160, 2006.
- Bahaj A. S., Molland A. F., Chaplin J. R., et Batten W. M. J. Power and thrust measurements of marine current turbines under various hydrodynamic flow conditions in a cavitation tunnel and a towing tank. *Renewable energy*, 32(3) :407–426, 2007.
- Barrick D. E. et Weber B. L. On the nonlinear theory for gravity waves on the ocean's

- surface. Part II : Interpretation and applications. *Journal of Physical Oceanography*, 7 (1) :11–21, 1977.
- Barrick D. E. et Evans M. W. *Hf coastal current mapping radar system*. October 1979. US Patent 4,172,255.
- Batchelor G. K. *The theory of homogeneous turbulence*. Cambridge University Press, 1953.
- Batten W. M. J., Bahaj A. S., Molland A. F., et Chaplin J. R. The prediction of the hydrodynamic performance of marine current turbines. *Renewable Energy*, 33(5) :1085–1096, 2008.
- Ben Elghali S. E., Benbouzid M. E. H., et Charpentier J. F. Marine tidal current electric power generation technology : State of the art and current status. In *Electric Machines & Drives Conference, 2007. IEMDC'07. IEEE International*, volume 2, pages 1407–1412. IEEE, 2007.
- Benzi R., Ciliberto S., Baudet C., et Chavarria G. R. On the scaling of three-dimensional homogeneous and isotropic turbulence. *Physica D : Nonlinear Phenomena*, 80(4) :385–398, 1995.
- Betz A. Das Maximum der theoretisch möglichen Ausnützung des Windes durch Windmotoren. *Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen*, 26(307-309) :8, 1920.
- Blunden L. S. et Bahaj A. S. Initial evaluation of tidal stream energy resources at Portland Bill, UK. *Renewable Energy*, 31(2) :121–132, 2006.
- Blunden L. S. et Bahaj A. S. Tidal energy resource assessment for tidal stream generators. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A : Journal of Power and Energy*, 221(2) :137–146, 2007.
- Blunden L. S., Bahaj A. S., et Aziz N. S. Tidal current power for Indonesia ? An initial resource estimation for the Alas Strait. *Renewable energy*, 49 :137–142, 2013.

- Bouferrouk A., Hardwick J. P., Colucci A. M., et Johanning L. Quantifying turbulence from field measurements at a mixed low tidal energy site. *Renewable Energy*, 87 :478–492, 2016.
- Boye H., Caquot E., Clement P., La Cochetiere L.de, Nataf J. M., et Sergent P. *Rapport de la mission d'étude sur les énergies marines renouvelables*. Paris : Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie,, 2013.
- Broche P., Salomon J. C., Demaistre J. S., et Devenon J. L. Tidal currents in Baie de Seine : Comparison of numerical modelling and high-frequency radar measurements. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 23(4) :465–476, 1986.
- Chamorro L. P., Hill C., Morton S., Ellis C., Arndt R. E. A., et Sotiropoulos F. On the interaction between a turbulent open channel flow and an axial-flow turbine. *Journal of Fluid Mechanics*, 716 :658–670, 2013.
- Couch S. J. et Bryden I. Tidal current energy extraction : Hydrodynamic resource characteristics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M : Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 220(4) :185–194, 2006.
- Crombie D. Doppler Spectrum of Sea Echo at 13.56 Mc./s. *Nature*, 175(4459) :681–682, 1955.
- Defant A. *Physical Oceanography*, volume 2. Pergamon Press, New York, 1961.
- DHI G. *Port of Dover - Tidal Energy Feasibility*. Pro-Tide Project, Stage 3 - Detailed Resource Assessment, 2015.
- DOE U. Energy Efficiency and Renewable Energy Marine and Hydrokinetic Database. *Energy Efficiency and Renewable Energy, US Department of Energy, Washington, DC, USA.*, 2010.
- Du Bois P. B., Dumas F., Solier L., et Voiseux C. In-situ database toolbox for short-term

- dispersion model validation in macro-tidal seas, application for 2d-model. *Continental Shelf Research*, 36 :63–82, 2012.
- Dumas F., Stanisière J.-Y., et Maurer D. Hydrodynamic characterization of the Arcachon Bay, using model-derived descriptors. *Continental Shelf Research*, 29(8) :1008–1013, 2009.
- Durán Medina O., Schmitt F. G., Calif R., Germain G., et Gaurier B. Turbulence analysis and multiscale correlations between synchronized flow velocity and marine turbine power production. *Renewable Energy*, 112 :314–327, 2017.
- Dyer K. R. et King H. L. The Residual Water Flow through the Solent, South England. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 42(1) :97–106, 1975.
- Edenhofer O., Pichs-Madruga R., Sokona Y., Seyboth K., Kadner S., Zwickel T., Eickemeier P., Hansen G., Schlömer S., et Stechow C.von. *Renewable energy sources and climate change mitigation : Special report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press, 2011.
- Elghali S. B. et al. . Les systèmes de génération d'énergie électriques à partir des courants de marée. *Revue 3EI*, (52) :73–85, 2008.
- Esteban M. et Leary D. Current developments and future prospects of offshore wind and ocean energy. *Applied Energy*, 90(1) :128–136, 2012.
- Fernandez-Rodriguez E., Stallard T. J., et Stansby P. K. Experimental study of extreme thrust on a tidal stream rotor due to turbulent flow and with opposing waves. *Journal of Fluids and Structures*, 51 :354–361, 2014.
- Forget P., Barbin Y., Broche P., Gaggelli J., et Garreau P. HF radar measurements of surface currents in the Northwestern Mediterranean Sea : first results. In *Geophysical Research Abstracts*, volume 8, page 02363, 2006.

- Frandsen S. T. *Turbulence and turbulence-generated fatigue loading in wind turbine clusters*. Ph.D. dissertation, Wind Energy Dept., Tech. Univ. Denmark, Kgs., Lyngby, Denmark., 2007.
- Friedrichs C. T. et Aubrey D. G. Non-linear tidal distortion in shallow well-mixed estuaries : a synthesis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 27(5) :521–545, 1988.
- Frisch U. et Morf R. Intermittency in nonlinear dynamics and singularities at complex times. *Physical review A*, 23(5) :2673, 1981.
- Frish U. *The legacy of A.N. Kolmogorov*. Cambridge University Press, 1995.
- Frost C., Evans P. S., Morris C. E., Mason-Jones A., O’Doherty T., et O’Doherty D. The effect of axial flow misalignment on tidal turbine performance. In *Proc. 1st int. conf. on renewable energies offshore ; 24th November, 2014*.
- Gerstandt K., Peinemann K.-V., Skilhagen S. E., Thorsen T., et Holt T. Membrane processes in energy supply for an osmotic power plant. *Desalination*, 224(1-3) :64–70, 2008.
- Geyer W. R. et Signell R. Measurements of tidal flow around a headland with a shipboard acoustic Doppler current profiler. *Journal of Geophysical Research : Oceans (1978–2012)*, 95(C3) :3189–3197, 1990.
- Goddijn-Murphy L., Woolf D. K., et Easton M. C. Current patterns in the inner sound (Pentland Firth) from underway ADCP data*. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 30(1) :96–111, 2013.
- Gooch S., Thomson J., Polagye B., et Meggitt D. *Site characterization for tidal power*. OCEANS 2009, MTS/IEEE Biloxi-Marine Technology for Our Future : Global and Local Challenges, 2009.
- Goormans T., Pandelaers , Smets S., et Notelé R. *Investigating the feasibility of energy*

- harvesting using potential energy at the tidal lock in heusden and using kinetic energy at several locations in the Scheldt River*. Report, Pro-Tide Project, 2013.
- Grant H. L., Stewart R. W., et Moilliet A. Turbulence spectra from a tidal channel. *Journal of Fluid Mechanics*, 12(02) :241–268, 1962.
- Gross T. F. et Nowell A. R. Spectral scaling in a tidal boundary layer. *Journal of Physical Oceanography*, 15(5) :496–508, 1985.
- Guillou N. et Thiébot J. The impact of seabed rock roughness on tidal stream power extraction. *Energy*, 112 :762–773, 2016.
- Guillou N., Chapalain G., et Neill S. P. The influence of waves on the tidal kinetic energy resource at a tidal stream energy site. *Applied Energy*, 180 :402–415, 2016.
- Gunawan B., Neary V. S., et Colby J. Tidal energy site resource assessment in the East River tidal strait, near Roosevelt Island, New York, New York. *Renewable Energy*, 71 : 509–517, 2014.
- Gurvitch A. Experimental research on frequency spectra of atmospheric turbulence. *Izv. Akad. Nauk SSSR, geofiz. ser*, 23 :1042–1055, 1960.
- Hagerman G., Polagye B., Bedard R., et Previsic M. *Methodology for estimating tidal current energy resources and power production by tidal in-stream energy conversion (TISEC) devices*. EPRI North American Tidal In Stream Power Feasibility Demonstration Project, 2006.
- Heathershaw A. D. The turbulent structure of the bottom boundary layer in a tidal current. *Geophysical Journal International*, 58(2) :395–430, 1979.
- Heide D., Von Bremen L., Greiner M., Hoffmann C., Speckmann M., et Bofinger S. Seasonal optimal mix of wind and solar power in a future, highly renewable Europe. *Renewable Energy*, 35(11) :2483–2489, 2010.

- Hurther D. et Lemmin U. A correction method for turbulence measurements with a 3d acoustic Doppler velocity profiler. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 18 (3) :446–458, 2001.
- IMDC . International Marine & Dredging Consultants - Final report - Study commissioned by Waterwegen en Zeekanaal NV, Sea Scheldt Division., 2011.
- Iyer A. S., Couch S. J., Harrison G. P., et Wallace A. R. Variability and phasing of tidal current energy around the United Kingdom. *Renewable Energy*, 51 :343–357, 2013.
- Jay S. Planners to the rescue : Spatial planning facilitating the development of offshore wind energy. *Marine Pollution Bulletin*, 60(4) :493–499, 2010.
- Jeffcoate P., Starzmann R., Elsaesser B., Scholl S., et Bischoff S. Field measurements of a full scale tidal turbine. *International Journal of Marine Energy*, 12 :3–20, 2015.
- Jouanneau N., Sentchev A., et Dumas F. Numerical modelling of circulation and dispersion processes in Boulogne-sur-Mer harbour (Eastern English Channel) : sensitivity to physical forcing and harbour design. *Ocean Dynamics*, 63(11-12) :1321–1340, 2013.
- Joukowsky N. E. *Windmill of the NEJ type*, volume 1. Transactions of the Central Institute for Aero-hydrodynamics of Moscow, 1920.
- Kaplan D. M. et Lekien F. Spatial interpolation and filtering of surface current data based on open-boundary modal analysis. *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 112(C12), 2007.
- Karsten R. H., McMillan J. M., Lickley M. J., et Haynes R. D. Assessment of tidal current energy in the Minas Passage, Bay of Fundy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A : Journal of Power and Energy*, 222(5) :493–507, 2008.
- Kelley N. D., Jonkman J., Scott N., Bialasiewicz J., et Redmond L. *The Impact of Coherent*

- Turbulence on Wind Turbine Aeroelastic Response and Its Simulation, WindPower 2005 Conference*. NREL/CP-500-38074, August, 2005.
- Kelley N., Osgood R., Bialasiewicz J., et Jakubowski A. Using time-frequency and wavelet analysis to assess turbulence/rotor interactions. In *2000 ASME Wind Energy Symposium*, page 36, 2000.
- Khan J. et Bhuyan G. *Ocean energy : global technology development status*. Ocean Energy Systems Implementing Agreement, International Energy Agency (IEA-OES), Paris, Technical Report, 2009.
- Kim S.-C., Friedrichs C. T., Maa J.-Y., et Wright L. D. Estimating bottom stress in tidal boundary layer from acoustic Doppler velocimeter data. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(6) :399–406, 2000.
- Kim S. Y. Observations of submesoscale eddies using high-frequency radar-derived kinematic and dynamic quantities. *Continental Shelf Research*, 30(15) :1639–1655, September 2010.
- Kim S. Y., Terrill E. J., et Cornuelle B. D. Mapping surface currents from HF radar radial velocity measurements using optimal interpolation. *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 113(C10), 2008.
- Kolmogorov A. N. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers. In *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, volume 30, pages 301–305. JSTOR, 1941.
- Korotenko K. A., Sentchev A. V., et Schmitt F. G. Effect of variable winds on current structure and Reynolds stresses in a tidal flow : analysis of experimental data in the eastern English Channel. *Ocean Science*, 8(6) :1025–1040, 2012.

- Korotenko K. et Sentchev A. Study turbulence in shallow tidal coastal zone. *Oceanology*, 51 :1–14, 2011.
- Lana A., Marmain J., Fernández V., Tintoré J., et Orfila A. Wind influence on surface current variability in the Ibiza Channel from HF Radar. *Ocean Dynamics*, 66(4) :483–497, 2016.
- Lawrence J., Kofoed-Hansen H., et Chevalier C. High-resolution metocean modelling at EMEC’s (UK) marine energy test sites. In *Proc. of the 8th European Wave and Tidal Energy Conference*, volume 7, 2009.
- Lazauskas L. et Kirke B. K. Modeling passive variable pitch cross flow hydrokinetic turbines to maximize performance and smooth operation. *Renewable energy*, 45 :41–50, 2012.
- Le Boyer A., Cambon G., Daniault N., Herbette S., Le Cann B., Marie L., et Morin P. Observations of the Ushant tidal front in September 2007. *Continental Shelf Research*, 29(8) :1026–1037, 2009.
- Le Duff M. et Hily C. *Environnement Naturel de l’Iroise. Bilan des connaissances et Intérêt patrimonial.*, volume 2. Rapport, convention DIREN Bretagne et l’Université de Bretagne Occidentale., 1999.
- Le Provost C. *Generation of overtides and compound tides, review.* John Wiley & Sons, Inc., New York, New York, 1991.
- Legrand C. *Assessment of Tidal Energy Resource : Marine Renewable Energy Guides.* The European Marine Energy Center, London, 2009.
- Lekien F., Coulliette C., Bank R., et Marsden J. Open-boundary modal analysis : Interpolation, extrapolation, and filtering. *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 109(C12), 2004.

- Lewis M., Neill S. P., Robins P. E., et Hashemi M. R. Resource assessment for future generations of tidal-stream energy arrays. *Energy*, 83 :403–415, 2015.
- Lien R.-C. et D’Asaro E. A. Measurement of turbulent kinetic energy dissipation rate with a Lagrangian float. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 23(7) :964–976, 2006.
- Liu P. et Veitch B. Design and optimization for strength and integrity of tidal turbine rotor blades. *Energy*, 46(1) :393–404, 2012.
- Lloyd G., editor. *Rules for classification and construction, IV Industrial Services, 6 Offshore Technology*. 2005.
- Lohrmann A., Cabrera R., et Kraus N. C. *Acoustic-doppler velocimeter(ADV) for laboratory use*. Fundamentals and advancements in hydraulic measurements and experimentation, 1994.
- Lu Y. et Lueck R. G. Using a broadband ADCP in a tidal channel. Part II : Turbulence. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 16(11) :1568–1579, 1999.
- Lux M., Pénard C., Cancet M., Lyard F., Lamouroux J., Bourgogne S., et Bronner E. *COMAPI : New regional tide solutions and high frequency dynamical atmospheric corrections*. OST-ST Meeting 2010, Altimetry for Oceans and Hydrology, 18 - 22 October, Lisbon, Portugal., 2010.
- Luznik L., Zhu W., Gurka R., Katz J., Nimmo Smith W. A. M., et Osborn T. R. Distribution of energy spectra, Reynolds stresses, turbulence production, and dissipation in a tidally driven bottom boundary layer. *Journal of Physical Oceanography*, 37(6) :1527–1550, 2007.
- MacEnri J., Reed M., et Thiringer T. Influence of tidal parameters on SeaGen flicker performance. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 371(1985) :20120247, 2013.

- Maganga F., Germain G., King J., Pinon G., et Rivoalen E. Experimental characterisation of flow effects on marine current turbine behaviour and on its wake properties. *IET Renewable Power Generation*, 4(6) :498, 2010.
- Malipeddi A. R. et Chatterjee D. Influence of duct geometry on the performance of Darrieus hydroturbine. *Renewable Energy*, 43 :292–300, 2012.
- Manwell J. F., McGowan J. G., et Rogers A. L. *Wind energy explained : theory, design and application*. John Wiley & Sons, 2010.
- Marmain J., Forget P., et Molcard A. Characterization of ocean surface current properties from single site HF/VHF radar. *Ocean Dynamics*, 61(11) :1967–1979, 2011.
- Marsh G. Wave and tidal power—an emerging new market for composites. *Reinforced Plastics*, 53(5) :20–24, 2009.
- McCaffrey K., Fox-Kemper B., Hamlington P. E., et Thomson J. Characterization of turbulence anisotropy, coherence, and intermittency at a prospective tidal energy site : Observational data analysis. *Renewable Energy*, 76 :441–453, 2015.
- McCann G., Thomson M., et Hitchcock S. Implications of site-specific conditions on the prediction of loading and power performance of a tidal stream device. In *2nd International Conference on Ocean Energy, Brest, France*, 2008.
- McMillan J. M., Hay A. E., Lueck R. G., et Wolk F. Rates of dissipation of turbulent kinetic energy in a high Reynolds number tidal channel. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 33(4) :817–837, 2016.
- Milne I. A., Sharma R. N., Flay R. G. J., et Bickerton S. The role of onset turbulence on tidal turbine blade loads. In *Proc. 17th Australasian Fluid Mechanics Conference, Auckland, NZ*, 2010.

- Milne I. A., Sharma R. N., Flay R. G. J., et Bickerton S. Characteristics of the turbulence in the flow at a tidal stream power site. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 371(1985), 2013.
- Milne I. A., Day A. H., Sharma R. N., et Flay R. G. J. The characterisation of the hydrodynamic loads on tidal turbines due to turbulence. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56 :851–864, 2016.
- Molcard A., Poulain P. M., Forget P., Griffa A., Barbin Y., Gaggelli J., De Maistre J. C., et Rixen M. Comparison between VHF radar observations and data from drifter clusters in the Gulf of La Spezia (Mediterranean Sea). *Journal of Marine Systems*, 78, Supplement : S79–S89, November 2009.
- Muljadi E. et Butterfield C. P. Pitch-controlled variable-speed wind turbine generation. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 37(1) :240–246, 2001.
- Muller H., Blanke B., Dumas F., Lekien F., et Mariette V. Estimating the Lagrangian residual circulation in the Iroise Sea. *Journal of Marine Systems*, 78 :S17–S36, 2009.
- Muller H., Blanke B., Dumas F., et Mariette V. Identification of typical scenarios for the surface Lagrangian residual circulation in the Iroise Sea. *Journal of Geophysical Research : Oceans (1978–2012)*, 115(C7), 2010.
- Multon B. *Energies marines renouvelables, aspects généraux, éolien, marémoteur et hydrolien*. EGEM. Hermes Science Publications - Lavoisier, 2012.
- Mycek P., Gaurier B., Germain G., Pinon G., et Rivoalen E. Experimental study of the turbulence intensity effects on marine current turbines behaviour. Part II : Two interacting turbines. *Renewable Energy*, 68 :876–892, 2014.
- Myers L. E. et Bahaj A. S. Experimental analysis of the flow field around horizontal axis

- tidal turbines by use of scale mesh disk rotor simulators. *Ocean Engineering*, 37(2) : 218–227, 2010.
- Neill S. P., Hashemi M. R., et Lewis M. J. The role of tidal asymmetry in characterizing the tidal energy resource of Orkney. *Renewable Energy*, 68 :337–350, 2014.
- Nezu I. et Nakagawa H. Turbulence measurements in unsteady free-surface flows. *Flow measurement and instrumentation*, 6(1) :49–59, 1995.
- Novikov E. A. The effects of intermittency on statistical characteristics of turbulence and scale similarity of breakdown coefficients. *Physics of Fluids A : Fluid Dynamics*, 2(5) : 814–820, 1990.
- Obhukov A. M. Energy distribution in the spectrum of turbulent flow. *Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. Geofiz*, 5 :453–466, 1941.
- Osalusi E., Side J., et Harris R. Structure of turbulent flow in EMEC’s tidal energy test site. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 36(5) :422–431, 2009.
- Ouahsine A., Smaoui H., et Senchev A. Modelling of Tide and Tidally Induced Hydro-Sedimentary Processes in the Eastern Part of the English Channel. *Journal of Marine Environmental Engineering*, 8(4), 2006.
- Paduan J. D. et Washburn L. High-frequency radar observations of ocean surface currents. *Annual review of marine science*, 5 :115–136, 2013.
- Peterson E. W. et Hennessey Jr J. P. On the use of power laws for estimates of wind power potential. *Journal of Applied Meteorology*, 17(3) :390–394, 1978.
- Pingree R. D. et Griffiths D. K. Sand transport paths around the British Isles resulting from M2 and M4 tidal interactions. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 59(02) :497–513, 1979.

- Pope S. B. *Turbulent flows*. Cambridge University Press, 2000.
- Prandle D. et Player R. Residual currents through the Dover Strait measured by HF radar. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 37(6) :635–653, 1993.
- Prandle D., Loch S. G., et Player R. Tidal flow through the Straits of Dover. *Journal of Physical Oceanography*, 23(1) :23–37, 1993.
- Prandle D. A new view of near-shore dynamics based on observations from HF radar. *Progress in oceanography*, 27(3) :403–438, 1991.
- Prandle D. Year-long measurements of flow-through the dover strait by HF radar and acoustic doppler current profilers (ADCP). *Oceanologica Acta*, 16(5-6) :457–468, 1993.
- Proudman J. *Physical Oceanography*. London : Methuen edition, 1953.
- Rawlings G. W. *Parametric characterization of an experimental vertical axis hydro turbine*. PhD thesis, University of British Columbia, 2008.
- Renosh P. R., Schmitt F. G., Loisel H., Sentchev A., et Mériaux X. High frequency variability of particle size distribution and its dependency on turbulence over the sea bottom during re-suspension processes. *Continental Shelf Research*, 77 :51–60, 2014.
- Reynolds O. An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels. *Proceedings of the royal society of London*, 35(224-226) :84–99, 1883.
- Richardson L. F. *Weather prediction by numerical process*. Cambridge University Press, 1922.
- Robins P. E., Neill S. P., Lewis M. J., et Ward S. L. Characterising the spatial and temporal variability of the tidal-stream energy resource over the northwest European shelf seas. *Applied Energy*, 147 :510–522, 2015.

- Rourke F. O., Boyle F., et Reynolds A. Tidal energy update 2009. *Applied Energy*, 87(2) : 398–409, 2010.
- Schmidt R. O. Multiple emitter location and signal parameter estimation. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 34(3) :276–280, 1986.
- Schmitt F. G. et Huang Y. *Stochastic Analysis of Scaling Time Series : From Turbulence Theory to Applications*. Cambridge University Press, 2016.
- Sentchev A. et Korotenko K. Dispersion processes and transport pattern in the ROFI system of the eastern English Channel derived from a particle-tracking model. *Continental Shelf Research*, 25(18) :2294–2308, 2005.
- Sentchev A. et Yaremchuk M. VHF radar observations of surface currents off the northern Opal coast in the eastern English Channel. *Continental Shelf Research*, 27(19) :2449–2464, 2007.
- Sentchev A. et Yaremchuk M. Monitoring tidal currents with a towed ADCP system. *Ocean Dynamics*, 66(1) :119–132, January 2016.
- Sentchev A. et Yaremchuk M. Tidal motions in the Dover Straits as a variational inverse of the sea level and surface velocity data. *Continental Shelf Research*, 19(15) :1905–1932, 1999.
- Sentchev A., Yaremchuk M., et Lyard F. Residual circulation in the English Channel as a dynamically consistent synthesis of shore-based observations of sea level and currents. *Continental Shelf Research*, 26(16) :1884–1904, 2006.
- Sentchev A., Forget P., Barbin Y., et Yaremchuk M. Surface circulation in the Iroise Sea (W. Brittany) from high resolution HF radar mapping. *Journal of Marine Systems*, 109 : S153–S168, 2013.

- Serhadloğlu S., Adcock T. A., Houlsby G. T., Draper S., et Borthwick A. G. Tidal stream energy resource assessment of the Anglesey Skerries. *International Journal of Marine Energy*, 3 :e98–e111, 2013.
- Shadden S. C., Lekien F., Paduan J. D., Chavez F. P., et Marsden J. E. The correlation between surface drifters and coherent structures based on high-frequency radar data in Monterey Bay. *Deep Sea Research Part II : Topical Studies in Oceanography*, 56(3-5) : 161–172, 2009.
- Sherwood C. R., Lacy J. R., et Voulgaris G. Shear velocity estimates on the inner shelf off Grays Harbor, Washington, USA. *Continental Shelf Research*, 26(17) :1995–2018, 2006.
- Siggia E. D. Numerical study of small-scale intermittency in three-dimensional turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 107 :375–406, 1981.
- Simpson J. H., Mitchelson-Jacob E. G., et Hill A. E. Flow structure in a channel from an acoustic Doppler current profiler. *Continental Shelf Research*, 10(6) :589–603, 1990.
- Soulsby R. L. Similarity scaling of turbulence spectra in marine and atmospheric boundary layers. *Journal of Physical Oceanography*, 7(6) :934–937, 1977.
- Soulsby R. L. Tidal-current boundary layers. *The Sea*, 9(part A) :523–566, 1990.
- Soulsby R. *Dynamics of Marine Sands : A Manual for Practical Applications*. London : Telford, 1997.
- Soulsby R. L. *The bottom boundary layer of shelf seas*, volume 35. Elsevier oceanography series, 1983.
- Speer P. E. et Aubrey D. G. A study of non-linear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems Part II : Theory. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 21(2) : 207–224, 1985.

- Stewart R. H. et Joy J. W. HF radio measurements of surface currents. In *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, volume 21, pages 1039–1049. Elsevier, 1974.
- Strachan P. A. et Lal D. Wind energy policy, planning and management practice in the UK : hot air or a gathering storm? *Regional Studies*, 38(5) :549–569, 2004.
- Thacker W. C. Fitting models to inadequate data by enforcing spatial and temporal smoothness. *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 93(C9) :10655–10665, 1988.
- Thacker W. C. The role of the Hessian matrix in fitting models to measurements. *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 94(C5) :6177–6196, 1989.
- Thomson J., Polagye B., Durgesh V., et Richmond M. C. Measurements of turbulence at two tidal energy sites in Puget Sound, WA. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 37(3) :363–374, 2012.
- Thomson R. E. et Emery W. J. *Data analysis methods in physical oceanography*. Elsevier, 2001.
- Van Troos K., Goormans T., Smets S., et Notelé R. *Investigating the feasibility of energy harvesting using potential energy at the tidal lock in Heusden and using kinetic energy at several locations in the Scheldt river*. Pro-Tide Project, – Section report 2 : Current measurements in the Sea Scheldt, 2014.
- Vennell R. Acoustic Doppler current profiler measurements of tidal phase and amplitude in Cook Strait, New Zealand. *Continental Shelf Research*, 14(4) :353–364, 1994.
- Venugopal V., Davey T., Smith H., Smith G., Holmes B., Barrett S., Prevosto M., Maison-dieu C., Cavalieri L., Bertotti L., et others . *EquiMar. Deliverable D2. 2. Wave and tidal resource characterisation*. 2011.
- Walter R. K., Nidzieko N. J., et Monismith S. G. Similarity scaling of turbulence spectra

- and cospectra in a shallow tidal flow. *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 116 (C10), 2011.
- Wolfram J. On assessing the reliability and availability of marine energy converters : the problems of a new technology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O : Journal of Risk and Reliability*, 220(1) :55–68, 2006.
- Xia J., Falconer R. A., et Lin B. Numerical model assessment of tidal stream energy resources in the Severn Estuary, UK. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A : Journal of Power and Energy*, 224(7) :969–983, 2010.
- Yaremchuk M. et Sentchev A. Mapping radar-derived sea surface currents with a variational method. *Continental Shelf Research*, 29(14) :1711–1722, 2009.
- Yaremchuk M. et Sentchev A. A combined EOF/variational approach for mapping radar-derived sea surface currents. *Continental Shelf Research*, 31(7) :758–768, 2011.
- Zhou F., Mahfuz H., Alsenas G. M., et Hanson H. P. Static and fatigue analysis of composite turbine blades under random ocean current loading. *Marine Technology Society Journal*, 47(2) :59–69, 2013.