

DESCRIPTIF DU SUJET ET ARGUMENTAIRE DU DIRECTEUR DE THESE

Nom et prénom du directeur de thèse : GERMAIN Grégory

Adresse mail : gregory.germain@ifremer.fr N° de tél : 06 85 92 11 68

Intitulé du sujet de thèse : Etude expérimentale des processus physiques instationnaires rencontrés en Manche

Résumé du sujet de thèse

La production primaire et la dispersion larvaire sont fortement régulées par les conditions environnementales et nos connaissances actuelles ne permettent pas de séparer les impacts anthropiques de la variabilité naturelle sur ces processus biologiques. En Manche, les conditions spécifiques de houle, courant, turbulence en faible profondeur d'eau induisent une dynamique particulière des processus physiques rencontrés qu'il est important de bien connaître avant d'étudier les effets de l'expansion des activités anthropiques et du changement climatique sur la dynamique de ces processus. Les mesures in-situ étant délicates et les outils numériques ne permettant pas de simuler l'ensemble des processus physiques en jeu, il est nécessaire de disposer d'outils expérimentaux permettant d'étudier ces phénomènes dans des conditions maîtrisées, régulées et répétables.

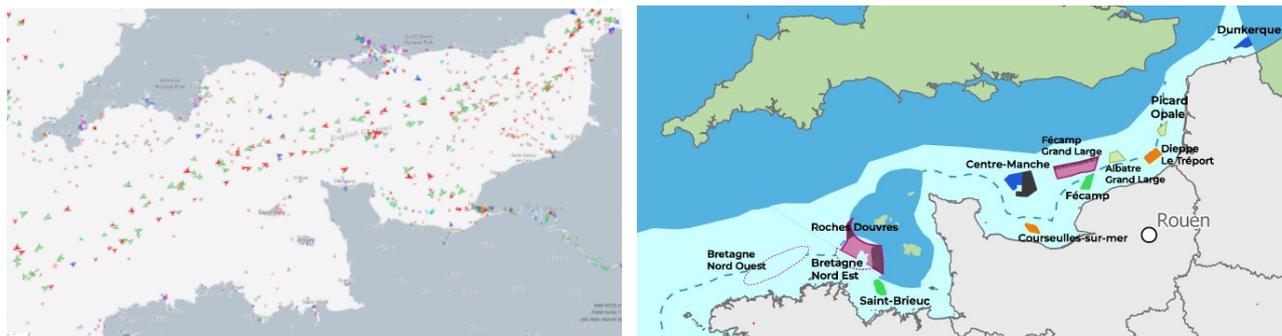
Dans ces travaux, il s'agira :

- d'**étudier les échanges énergétiques** rencontrés en Manche dus à la houle, aux courants de marée et à la turbulence, en profondeur faible et variable ;
- d'**étudier l'impact des processus physiques instationnaires** sur la dynamique naturelle du milieu, notamment sur la stratification de l'eau (température, salinité) ;
- d'**étudier et d'évaluer les impacts des activités anthropiques sur les processus physiques naturels.**

DESCRIPTIF DU SUJET

1) Le sujet de recherche choisi et son contexte scientifique et économique

La production primaire (phyto/zoo-plancton) et la dispersion larvaire sont fortement influencées par les conditions environnementales [1]. Plusieurs études montrent qu'avec nos connaissances actuelles, il est difficile de séparer les impacts de l'activité humaine de la variabilité naturelle sur ces processus biologiques [2, 3]. Dans la Manche, les conditions spécifiques de houle, de courant et de turbulence dues aux faibles profondeurs d'eau induisent une dynamique d'écoulement particulière (différente de celle de l'Océan). Une bonne connaissance des processus physiques mis en jeu est donc primordiale avant d'étudier les effets du changement climatique et de l'expansion sans précédent des activités humaines sur la dynamique de ces processus : intensification du trafic maritime et de l'effort de pêche, développement des parcs éoliens et hydroliens (illustrées sur les figures ci-dessous). En effet, les effets induits par le trafic maritime se répercutent sur l'ensemble de la route des navires (et la colonne d'eau) [4] alors que ceux induits par les nouvelles activités humaines se produisent d'abord à l'échelle des ouvrages (de l'ordre d'une dizaine de mètres pour les supports d'éolienne et les hydroliennes) et se combinent à l'échelle des parcs (plusieurs kilomètres) avec un effet potentiel à l'échelle régionale (dizaines de km) [5], ce qui rend ce genre d'étude particulièrement difficile.



Etat du trafic maritime en Manche le 09/01/2025 (à gauche) et localisation des projets de parcs éoliens français dans la Manche (à droite, où les projets anglais ne sont pas représentés)

Les mesures in situ sont délicates et les outils numériques ne permettent pas à ce jour de simuler l'ensemble des processus physiques mis en jeu : phénomènes à forte variabilité et intermittents, présence d'événements rares et extrêmes. Il est donc nécessaire de disposer d'outils expérimentaux permettant d'étudier finement ces phénomènes dans des conditions contrôlées (maîtrisées, régulées et répétables) [6]. L'ampleur de la gamme d'échelles concernées, la complexité des mécanismes hydrodynamiques rencontrés mais aussi l'amplitude et la variabilité des perturbations induites au regard de la variabilité naturelle, rendent difficile la quantification de l'impact des activités humaines sur les processus physiques rencontrés. En effet, les supports d'éoliennes offshore engendrent a priori des perturbations relativement faibles mais étendues et les navires des perturbations élevées mais localisées.

Les sillages générés par ces activités humaines ont une largeur initiale de l'ordre de la taille de la structure (navire, mat d'éolienne, hydrolienne), qui s'élargit vers l'aval et induit un mélange des masses d'eau. Cette activité tourbillonnaire de sillage peut être simulée numériquement et expérimentalement à l'échelle des mats, des turbines [7, 11] et des navires [16] afin de paramétrer l'effet de mélange induit par ces différents types de sillages dans les modèles d'hydrodynamique côtière. Ces modèles régionaux ont cependant une résolution insuffisante pour représenter explicitement les phénomènes de sillage. Ils doivent donc être modifiés pour permettre d'estimer plus précisément l'effet combiné des sillages à l'échelle régionale [10].

Des premiers travaux ont été menés en mer du Nord pour quantifier in situ les impacts induits par la présence des mats supportant les éoliennes sur la structure hydrologique de la colonne d'eau [8, 2, 11]. Avec les techniques actuelles, les effets de sillage peuvent être observés en surface à partir des données optiques satellitaires [12] et radar [9] mais pas sur l'ensemble de la colonne d'eau. La première modélisation numérique des effets directs sur le mélange des écoulements a mis en évidence la nécessité de contrôler à la fois les effets de mélange à l'échelle du sillage et la dispersion à l'échelle régionale afin de déterminer l'ampleur de l'impact global d'un parc éolien sur la structure hydrologique de la colonne d'eau [8]. De même, si le sillage proche des propulseurs de navires sont bien connus, leur dynamique dans la colonne d'eau en profondeur faible et variable comme en Manche est peu étudiée alors que le trafic maritime s'intensifie [3]. Globalement, l'avancement de ces différents travaux (modélisations numériques et théoriques, expérimentations en laboratoire, observation in situ et spatiale) relatifs aux impacts directs reste préliminaire et nécessite d'être consolidé et comparé de manière plus systématique. En effet, les sujets abordés en prévision du développement des parcs éoliens offshore et hydroliens en Manche concernant le milieu physique marin couvrent les études d'impact sur les courants, le niveau de la mer et la turbidité mais ne considèrent pas les effets sur la variabilité de la colonne d'eau et le mélange des masses d'eau. En particulier, les effets combinés des courants et des vagues sont actuellement ignorés dans la majorité des études numériques réalisées à l'échelle régionale et nécessitent des études dédiées, notamment en profondeur variable et faible.

Dans ce travail, nous proposons d'**étudier expérimentalement les effets des activités anthropiques sur des processus physiques naturels produisant des échanges énergétiques complexes** sans omettre les effets combinés des courants et des vagues en faible profondeur rencontrés en Manche où sont présents de forts courants de marée et des conditions de houle sévères. Sachant que la production primaire (phyto/zoo-plancton) et les embryons et larves des animaux marins agissent comme des scalaires passifs au sein des écoulements turbulents, accéder aux processus physiques instationnaires mis en jeu et liés aux interactions complexes entre les courants et les vagues (fortement influencées par les conditions environnementales) permettra de **mieux appréhender la variabilité de la production primaire (phyto/zoo-plancton) et la dispersion larvaire en Manche**. Cette connaissance est primordiale car leurs conséquences peuvent impacter le domaine maritime dans son ensemble (trafic maritime, professionnel de la pêche, producteurs d'énergie).

2) L'état du sujet dans le laboratoire d'accueil.

Alors que le trafic maritime s'intensifie, que l'effort de pêche ne faiblit pas et que les projets de développement de parcs éoliens offshore et hydroliens deviennent une réalité en Manche, il n'existe toujours pas d'outils génériques permettant de quantifier finement les impacts environnementaux de ces activités humaines. Pour contribuer à une meilleure connaissance des échanges d'énergie rencontrés sur les principales routes maritimes (rails montant et descendant de la Manche) et dans les parcs éoliens offshore et hydroliens et de leurs impacts sur les processus hydro-sédimentaires par modification de la turbulence et donc sur la production primaire, il est essentiel d'avoir au préalable une bonne connaissance de l'impact de ces processus physiques instationnaires sur la dynamique naturelle du milieu (gradients de température et de salinité). Le développement d'une instrumentation spécifique pour mesurer la température et la salinité dans un bassin à houle et à courant fera l'objet d'une attention particulière, tout comme les conditions de forçage de température et de salinité. Ce forçage sera plus ou moins conséquent selon les niveaux de dissipation/diffusion/production impliqués lors des essais.

Ce projet permettra de **valoriser les compétences et moyens expérimentaux développés depuis de nombreuses années au sein du Laboratoire d'Hydrodynamique Marine** de l'Ifremer (LHyMar), notamment au travers de projets de thèse [17, 18, 19]. Des premiers travaux sur l'effet de la houle sur l'hydrodynamique dans la colonne d'eau ont notamment été effectués dans le cadre de la thèse de M. Magnier [19] et sur la modification du développement de sillage d'hydrolienne par MA. Dufour. De plus, les résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de cette thèse permettront également d'améliorer les modèles numériques utilisés dans les codes développés en interne [14, 15]. Une mise en commun des travaux avec P. Bothorel (thèse sur le projet EMOI [13] démarrée en janvier 2025 sur le sujet *Étude expérimentale et in-situ de l'impact d'éolienne offshore sur les processus physiques en Manche*) facilitera la bonne réalisation des travaux proposés dans cette nouvelle thèse.

3) Les objectifs visés, les résultats escomptés.

Dans le cadre de ce travail de thèse expérimental, nous proposons d'étudier :

- les **échanges énergétiques rencontrés en Manche** (houle, courant, turbulence en profondeur faible et variable) ;
- **l'impact des processus physiques instationnaires sur la dynamique naturelle du milieu** (gradients de température et de salinité) ;
- **l'impact des activités anthropiques** (trafic maritime et développement des parcs éoliens et hydroliens) sur les processus physiques naturels et sur l'environnement.

Les retombées scientifiques attendues sont multiples et visent principalement à obtenir une bonne caractérisation et compréhension des processus physiques instationnaires en présence d'écoulements réalistes complexes et de variations bathymétriques. La principale difficulté résidera dans la capture des processus physiques à différentes échelles spatiales et temporelles. Une meilleure compréhension des mécanismes physiques permettra de mieux paramétrer les modèles numériques à grande échelle utilisés pour modéliser la dynamique des océans et intégrer correctement la prise en compte des principales activités anthropiques. Ces résultats seront également exploités dans le cadre du projet EMOI (financé par l'Observatoire national de l'Eolien en Mer [13]), avec l'aide des chercheurs impliqués dans le Work Package Océanographie Physique.

Les résultats feront l'objet de publications de rang A et de participations à des conférences internationales (RENEW, EWTEC) avec également des impacts potentiels dans les domaines du trafic maritime, de l'éolien offshore et de l'hydrolien dont les sillages impactent les processus hydro-sédimentaires par modification de la turbulence, mais aussi ainsi la production primaire et la dispersion larvaire.

4) Le programme de travail avec les livrables et l'échéancier prévisionnel.

L'ensemble de ces travaux s'appuiera principalement sur des expérimentations menées dans le bassin à houle et courants de l'Ifremer où des développements spécifiques devront être entrepris pour étudier l'ensemble des processus physiques rencontrés. Pour ce travail, il sera nécessaire de **mesurer finement les variations spatio-temporelles d'énergie cinétique turbulente, de température et de salinité**. Pour ce faire, nous développerons de nouveaux protocoles d'essais afin de garantir une bonne précision et répétabilité des mesures. L'instrumentation classique (systèmes de mesure de vitesse d'écoulement LDV-Laser Doppler Velocimetry et PIV-Particle Image Velocimetry, capteurs de mesure de pression, température et salinité) sera également utilisée. Si nécessaire, les échanges énergétiques seront étudiés avec des forçages spécifiques (injection d'eau à température et salinité régulées) pour valider la méthodologie mise en place. Les maquettes génériques de navire, d'hydroliennes et de mat d'éolienne sont d'ores et déjà disponibles à l'Ifremer.

Echéancier prévisionnel:

- 1/ **Etude bibliographique** sur les processus physiques naturels et les échanges énergétiques rencontrés en mer avec un focus sur ces processus en lien avec les activités anthropiques.
- 2/ **Essais expérimentaux** pour quantifier les échanges d'énergie en présence de houle, de courants et de variations bathymétriques à partir de mesures PIV et LDV.
- 3/ **Caractérisation des échanges d'énergie** produits par des conditions d'écoulement instationnaire.
- 4/ **Développement d'instruments** pour mesurer les processus physiques instationnaires sur la dynamique des gradients de température et de salinité.
- 5/ Essais expérimentaux pour **quantifier l'impact des activités humaines** (trafic maritime, parcs éoliens et hydroliens) **sur les processus physiques naturels**.

Durant les trois années, une attention particulière sera portée afin que les questions scientifiques listées ci-dessus soient correctement abordées, notamment celles relatives au développement de protocoles

expérimentaux permettant de caractériser l'impact des activités anthropiques (trafic maritime, parcs éoliens offshore et hydroliens) sur les processus physiques naturels.

5) Les collaborations prévues.

Ce travail de thèse sera réalisé en co-direction avec Philippe Druault de Sorbonne Université, spécialiste en traitement de données PIV et numériques, des outils mathématiques d'analyse de données et de la turbulence. La poursuite de cette collaboration permettra de développer des outils de traitement de données et de méthodes d'analyses spécifiques. Les bases de données créées et les résultats obtenus seront partagés avec l'ensemble de la communauté scientifique et particulièrement avec les chercheurs des laboratoires travaillant sur la Manche (Université de Lille, Station Marine de Wimereux, ULCO, Universités normandes, Ecole Navale de Brest) afin de coordonner au mieux les efforts de recherche.

6) Une liste de publications portant directement sur le sujet en soulignant celles du laboratoire.

- [1] Daewel U. et al., Offshore wind farms are projected to impact primary production and bottom water deoxygenation in the North Sea, Communications earth & environment, 2022.
- [2] Floeter J. et al. Pelagic effects of offshore wind farm foundations in the stratified North Sea, Progress in Oceanography, 2017.
- [3] Nylund A. et al., In situ observations of turbulent ship wakes and their potential implications for vertical mixing, Ocean Sci., 2021.
- [4] Golbraikh, E. et al., A model for the estimation of the mixing zone behind large sea vessels, Environ. Sci. Pollut. Res., 27, 2020.
- [5] S. Wu et al., New insights on wind turbine wakes from large-eddy simulation: Wake contraction, dual nature, and temperature effects, Wind Energy, 2023.
- [6] P. Bullee et al., The influence of water turbulence on surface deformations and the gas transfer rate across an air–water interface, Experiments in Fluids, 2024.
- [7] Ajmi S. et al., Numerical Study of Turbulent Wake of Offshore Wind Turbines and Retention Time of Larval Dispersion. JMSE, 2023
- [8] Carpenter J. R. et al., Potential impacts of offshore wind farms on North Sea stratification, 2016.
- [9] Li X. et al., SAR observation and numerical modeling of tidal current wakes at the East China Sea offshore wind farm. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2014.
- [10] Rivier A. et al., Parameterization of wind turbine impacts on hydrodynamics and sediment transport. Ocean Dynamics, 2016.
- [11] Schultze L. K. P. et al., Increased mixing and turbulence in the wake of offshore wind farm foundations. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2020.
- [12] Vanhellefont Q. et al., Turbid wakes associated with offshore wind turbines observed with Landsat 8. Remote Sensing of Environment, 2014.
- [13] <https://www.eoliennesenmer.fr/observatoire-eolien-en-mer-2023-2024>
- [14] <https://code-dorothy.ifremer.fr/> ; [15] <https://resourcecode.ifremer.fr/>
- [16] Posa A. et al., The wake flow downstream of a propeller-rudder system, International Journal of Heat and Fluid Flow, 2021.
- [17] Dufour MA. Et al., Development and validation of a lifting line code associated to the Vortex Particles Method software DOROTHY, Wind Energy, 2024.
- [18] Druault P. et al., On the necessity of considering the hub when examining the induction of a horizontal axis tidal turbine, Renewable Energy, 2024.
- [19] Magnier M. et al., Modification of the wake of a wall-mounted bathymetry obstacle submitted to waves opposing a tidal current, Ocean Engineering, 2023.