



**Sujet de thèse : Vers une modélisation unifiée des interactions vagues-courant-turbulence en 3D : sites d'application en mer côtière, Raz Blanchard (France) et Gregory Sound (Irlande)**

**Direction de thèse : A.-C. Bennis (dir., Univ. Caen), F. Dias (co-dir., ENS-Paris Saclay/Univ. College of Dublin)**

**Résumé.** L'objectif principal de cette thèse est d'aller vers **une modélisation unifiée des interactions vagues-courant-turbulence en trois dimensions**, avec deux sites d'application en mer côtière, le **Raz Blanchard** (France) et le **Gregory Sound** (Irlande), qui sont clés pour le développement des **énergies marines renouvelables**. A terme, ce travail de recherche fondamentale permettra d'améliorer la connaissance des processus d'interactions hydrodynamiques et d'aider au dimensionnement et au déploiement des engins récupérateurs d'énergie.

Pour aborder ce problème de modélisation unifiée, nous proposons d'intégrer en particulier les modèles de turbulence LES originaux et ne nécessitant pas de modélisation du tenseur sous-maille, Navier-Stokes- $\alpha$  (LANS- $\alpha$ ) et Leray- $\alpha$  (e.g. Geurts et Holm, 2006 ; Hecht et al., 2008) aux jeux d'équations modélisant les interactions vagues-courant en 3D à phase moyennée (McWilliams et al., 2004 ; Arduin et al., 2008 ; Bennis et al., 2011) et en non hydrostatique.

Les  $\alpha$ -modèles ont été implémentés et testés avec succès pour la première fois dans un modèle océanographique côtier 3D pour une application au Raz Blanchard (Bennis et al., 2021 ; Adong et Bennis, 2019) sans prise en compte de l'effet des vagues. Dans ces approches, la turbulence est prise en compte via les termes d'advection non linéaires, plutôt que par l'ajout d'un effet dissipatif modélisé par une viscosité sous-maille, et l'introduction d'une vitesse de régularisation. Cette vitesse régularisée est obtenue à partir de la vitesse contenant toutes les échelles de la turbulence à laquelle une filtration spatiale différentielle est appliquée. Cette modélisation a d'abord été testée sur le cas test de Hecht et al., (2008), visant à reproduire la circulation induite par le vent, puis appliquée au site du Raz Blanchard (Bennis et al., 2021 ; Adong et Bennis, 2019). Les résultats obtenus sont les suivants : i) la modélisation LANS- $\alpha$  ré-energétise l'écoulement en récupérant les statistiques de la turbulence obtenues à haute résolution dans des simulations à plus basse résolution, ce qui permet de gagner 30% de temps de calcul, ii) le LANS- $\alpha$  reproduit les deux types de régime inertiel pour la turbulence barotrope, avec des décroissances d'énergie turbulente en  $k^{-5/3}$  et en  $k^{-3}$  ( $k$  étant le nombre d'onde) et iii) le LANS- $\alpha$  impacte fortement la représentation de la turbulence induite par déformation des tubes de vorticité. La modélisation Leray- $\alpha$  montre des comportements similaires à la modélisation LANS- $\alpha$ , avec également une r -energ tisation de l'écoulement.

  travers ce projet de thèse appliqué à deux sites d'études en mer côtière, nous chercherons à répondre aux questions scientifiques suivantes :

- i) Quels sont les apports de la modélisation Leray- $\alpha$  et LANS- $\alpha$  à la représentation de la turbulence marine tri-dimensionnelle par temps calme et pour les 2 sites ?

- ii) Quel jeu d'équations est le plus pertinent pour une modélisation unifiée des interactions vagues-courant-turbulence en 3D dans les modèles océanographiques côtiers ?
- iii) Quelle est la pertinence de ce nouveau jeu d'équations en situations réalistes en fonction des conditions météo-marines et au regard des modélisations existantes ?

**Sites d'étude.** Deux sites d'étude ont été choisis pour leur complémentarité : le Raz Blanchard (France) et le Gregory Sound (Irlande).

Le site français se situe entre le cap de la Hague et l'île d'Aurigny. Il s'agit du **Raz Blanchard**, 1<sup>er</sup> site hydrolien en Europe occidentale, avec un potentiel hydrolien maximal de 5,1GW (Coles et al., 2017). Soumis à l'influence de la marée semi-diurne (régime mégatidal), la vitesse du courant peut atteindre 5 m/s lors des marées d'équinoxe pour une profondeur d'eau de 20-80m. Son nom Blanchard provient de la présence quasi permanente d'écume à sa surface en raison des nombreux déferlements de vagues sous l'action du courant.

Les travaux de recherche passés ont montré une grande variabilité et un niveau élevé de turbulence dans la colonne d'eau et près du fond en raison des interactions entre l'hydrodynamique et la morphologie du fond (e.g. Furgerot et al. 2020 ; Thiebaut et al. 2020). Cependant, malgré les efforts récents pour mesurer cette activité turbulente, des difficultés subsistent encore pour évaluer les structures turbulentes 3D, notamment près du fond, comme le rapportent Mercier et al. (2021). En complément, des modélisations numériques innovantes de type LES (e.g. Bennis et al. 2021 ; Mercier et al. 2020 ; Bourgoïn et al., 2020) ont été développées afin d'aider à la compréhension des mouvements turbulents. Ces travaux ne prennent pas en compte les effets des interactions vagues-courant sur la turbulence marine. Cependant, ces interactions ont une influence significative dans le Raz Blanchard comme montré par Bennis et al., 2020, 2022 et Furgerot et al., 2020. Les données in-situ, en complément de données radar Haute-Fréquence, ont révélé que les effets des vagues étaient absents uniquement 6% du temps de juin 2017 à juillet 2018 et que de forts cisaillements de courant étaient observés dans la moitié supérieure de la colonne d'eau. En outre, lors de la tempête Eleanor (2018), une augmentation de l'asymétrie flot/jusant, induite par les vagues, de 3% à 13% a été observée, réduisant le productible hydrolien jusqu'à 30% (Bennis et al., 2022).

En complément du Raz Blanchard, le site **Gregory Sound** sera utilisé pour valider et apprécier l'apport de la modélisation 3D vagues-courant-turbulence. Ce site, situé entre les îles d'Aran (Inis Mor et Inis Meain) sur la côte atlantique irlandaise à la sortie de la baie de Galway, est soumis également à la marée semi-diurne (régime macrotidal) et sa profondeur atteint 35m au milieu du goulet. Les courants annuels maximum intégrés sur la verticale sont d'environ 2.3 m/s (McCullagh et al., 2020), avec de fortes asymétries en intensité et direction (cf. Fig 1B). Les marnages sont 4/5 m en moyenne et le vent joue également un rôle important. En ce qui concerne les états de mers, en cas de tempête il y a principalement de la houle entrante (cas typique à l'intérieur du goulet : 3m de Hs, 6s en entrée - 4s en sortie pour Tm02, houle dirigée nord-ouest) et de la mer croisée en sortie de goulet côté Galway Bay avec de la houle entrant par le North Sound. Le site est caractérisé par une forte turbulence qui n'a pas encore été étudiée à ce jour. Le fond est rugueux (roches, graviers et sable graveleux). Le déferlement des vagues y est pratiquement omniprésent. Les falaises qui bordent le Gregory Sound permettent le déploiement d'un ensemble de capteurs (radar, stéréo-caméras, sismomètre et en amont une bouée houlographe ainsi qu'un courantomètre profileur).

**Profil recherché.** Le/La candidat(e) est actuellement en Master 2 ou en dernière année école d'ingénieur dans les domaines suivants : i) océanographie physique, ii) mécanique des fluides pour l'environnement, iii) mathématiques appliquées à l'environnement ainsi que tout autre domaine connexe.

Les pré-requis pour cette thèse sont les suivants :

- Connaissances approfondies en océanographie physique, mécanique des fluides et turbulence,
- Connaissances en modélisation numérique pour l'océanographie et/ou mécanique des fluides,
- Connaissances en programmation scientifique (par ex. Fortran, python, matlab),
- Maîtrise des langues française et anglaise (écrit et oral).

**Procédure de candidature.** Merci d'envoyer **au plus tard le 31 mars 2022** un CV détaillé, une lettre de motivation personnalisée, deux lettres recommandations et les relevés de notes pour les années de Master 1 et de Master 2 à **Anne-Claire Bennis** ([anne-claire.bennis@unicaen.fr](mailto:anne-claire.bennis@unicaen.fr)) et **Frédéric Dias** ([frederic.dias@ucd.ie](mailto:frederic.dias@ucd.ie)).

### Références utiles.

- Adong, F. and A.-C. Bennis, (2019). LANS-alpha and Leray-alpha turbulence models for coastal simulations: application to Alderney Race. *Proceedings of EWTEC 2019, Sustainable energy research Group*.
- Aiki, H. and R. J. Greatbatch, (2012). Thickness-weighted mean theory for the effect of surface gravity waves on mean flows in the upper ocean. *J. Phys. Oceanogr.*
- Ardhuin, F., et al., (2008). Explicit wave-averaged primitive equations using a generalized Lagrangian mean. *Ocean Modelling*.
- Bennis A.-C., et al., (2011). On the coupling of wave and three-dimensional circulation models: Choice of theoretical framework, practical implementation and adiabatic tests. *Ocean Modelling*.
- Bennis A.-C., et al., (2020). Numerical modelling of three-dimensional interactions in a complex environment: application to Alderney Race. *Applied Ocean Research*.
- Bennis, A.-C., et al., (2021). LANS-alpha turbulence modeling for coastal sea : An application to Alderney Race. *J. Comp. Phys.*
- Bennis, A.-C., et al., (2022). A winter storm in Alderney Race: impacts of 3D wave-current interactions on the hydrodynamic and tidal stream energy. *Applied Ocean Research*.
- Bourgoin, A., et al. (2020). Turbulence characterization at a tidal energy site using large-eddy simulations: case of the Alderney Race. *Phil. Trans. R. Soc. A*.
- Coles, D. S., et al., (2017). Assessment of the energy extraction potential at tidal sites around the channel islands. *Energy*.
- Craik, A. D. D. and S. Leibovich, (1976). A rational model for Langmuir circulations. *J. Fluid Mech.*
- Smith, J. A., (2006). Wave-current interactions in finite-depth. *J. Phys. Oceanogr.*
- Furgerot, L., et al., (2020). One year measurement in Alderney Race: what did we learn ? *Phil. Trans. R. Soc. A*.
- Geurts, B. J., et D. D. Holm, (2006). Leray and LANS-alpha modeling of turbulent mixing. *Journal of turbulence*.
- Groeneweg, J. and G. Klopman (1998). Changes in the mean velocity profiles in the combined wave-current motion described in GLM formulation. *J. Fluid Mech.*
- Hecht, M. W., et al., (2008). Implementation of the LANS-alpha turbulence model in a primitive equations ocean model. *J. Comp. Phys.*
- Longuet-Higgins, M. S. and R. W. Stewart, (1962). Radiation stresses and mass transport in surface gravity waves with application to 'surf beats'. *J. Fluid Mech.*
- Marchesiello, P., et al., (2021). Tridimensional nonhydrostatic transient rip currents in a wave-resolving model. *Ocean Modelling*.
- Marchesiello P., et al., (2015). On tridimensional rip current modeling. *Ocean Modelling*.
- McCullagh, D., et al. (2020). Geomorphology and substrate of Galway Bay, Western Ireland. *J. Maps*.
- McWilliams, J. C., et al., (2004). An asymptotic theory for the interaction of waves and currents in coastal waters. *J. Fluid Mech.*
- Mercier, P., et al., (2020). Numerical study of the turbulent eddies generated by the seabed roughness. case study at a tidal power site. *Applied Ocean Research*.
- Mercier, P., et al., (2021). Turbulence measurements: An assessment of acoustic doppler current profiler accuracy in rough environment. *Ocean Engineering*.
- Phillips, O. M., (1977). The dynamics of the upper ocean. *Cambridge University Press, London*
- Thiebaut, M., et al., (2020). A comprehensive assessment of turbulence at a tidal-stream energy site influenced by wind-generated ocean waves. *Energy*.