

Doctoral Dissertation

Doctoral Program in Mechanical Engineering (36th cycle)

Multi-scale multi-fidelity numerical modelling of wave energy converter farms

By

Beatrice Battisti

Supervisors:

Prof. Giovanni Bracco, Politecnico di Torino, Supervisor

Dr. Michel Bergmann, Université de Bordeaux,

Co-Supervisor

Doctoral Examination Committee:

Prof. Simone Camarri, Referee, Università di Pisa

Prof. Angelo Iollo, Université de Bordeaux

Prof. Stefano Mauro, Politecnico di Torino

Dr. Vincenzo Nava, Referee, Tecnalia/BCAM

Dr. Angela Scardigli, Optimad Srl

Politecnico di Torino & Université de Bordeaux

2024

Long Abstract

In response to the dynamic evolution of the energy landscape toward more sustainable solutions, the marine sector has increasingly turned its focus toward wave energy as a promising avenue for clean energy generation. The deployment of Wave Energy Converters (WECs) in farms holds significant potential for achieving commercial-scale production of renewable energy, but this endeavor necessitates thorough numerical simulations due to the complex hydrodynamics involved. The simulation of WEC farms poses considerable challenges due to their inherently multiscale nature, encompassing the accurate representation of fluid-structure interactions and the interactions among WECs, resulting in near-field effects, and far-field effects, which represent the broader influence of the farm on its surrounding environment. While conventional high-fidelity models, notably Computational Fluid Dynamics (CFD), are indispensable for capturing the complexities of highly nonlinear phenomena in such systems, they come with a high computational price. Model order reduction techniques emerge as a promising approach to mitigate this challenge, aiming to reduce the computational complexity of numerical simulations while maintaining accuracy. Among these techniques, the Proper Orthogonal Decomposition (POD) method stands out as an effective means of deriving a reduced basis in high-dimensional flow systems. Projection-based Reduced Order Models (ROMs) based on POD have demonstrated success in linear and weakly nonlinear model reductions, particularly in monophasic flows. However, when dealing with multiphase flows, traditional ROMs obtained via POD and Galerkin projection techniques face several obstacles. These include instability concerns, compatibility issues with model order reduction - evident in the emergence of a fourth-order tensor in the primary dynamical system -, complexities in modeling moving bodies, and difficulties in implementation with commercial codes lacking direct access to the source code. All these considerations lead to the development of a non-intrusive, Galerkin-free approach based on domain decomposition and equipped with sensor

information to account for travelling waves. This multi-fidelity model integrates CFD and POD spatially. The high-fidelity CFD solver is deployed in the near-field around obstacles, where viscous effects and nonlinearities predominate. In contrast, the POD ROM model is tailored for weakly nonlinear regions, focusing on far-field wave propagation. By leveraging a small high-fidelity domain, which represents only a fraction of the original domain used in training the POD modes, the approach achieves significant reductions in CPU costs while preserving precision. Central to this approach is the bidirectional exchange of information between the two models, facilitated by overlapping regions and subdomain boundaries. The simplicity and efficacy of the coupling methodology make it readily applicable to diverse simulations involving moving bodies, including wave energy conversion, allowing for an efficient representation of multiscale properties. This methodology demonstrates accurate flow reconstruction and a comprehensive description of floater dynamics. Extensive validation tests encompass both in-sample simulations, for reproduction configurations, and, more notably, out-of-sample simulations. The latter underscore the accuracy and robustness of the proposed methodology, able to predict solutions for unseen parameters. The efficiency of this hybrid fidelity model empowers the execution of intensive simulations, rendering it suitable for a wide range of applications, including parametric studies, optimization tasks, and multiple-query simulations. By substantially reducing computational costs, the coupled model not only expedites optimization and design processes for wave energy converter farms but also paves the way for enhanced scalability and sustainability in the marine energy sector.

Keywords: Proper Orthogonal Decomposition, Wave Energy, Mathematical Modelling, Reduced-Order Models, Numerical Simulations, Multifidelity models.

Modélisation multi-échelle et multi-fidélité pour des extracteurs d'énergie marine

Résumé étendu

Face à l'évolution de la scène énergétique vers des solutions plus durables, le secteur marin s'intéresse de plus en plus à l'énergie des vagues pour la production d'énergie propre. Le déploiement de convertisseurs d'énergie des vagues (WECs)

dans des fermes offre un potentiel significatif pour une production à grande échelle, mais cela nécessite de simulations numériques approfondies, en raison de la complexité de l'hydrodynamique. La simulation de fermes de WECs pose des défis considérables en raison de leur nature multi-échelle, incluant la représentation précise des interactions fluide-structure et entre les WECs, entraînant des effets de champ proche, et de champ lointain, représentant l'influence plus large de la ferme sur son environnement. Bien que les modèles haute fidélité, comme la CFD (Computational Fluid Dynamics), soient essentiels pour capturer les complexités des phénomènes non linéaires, ils sont accompagnés d'un coût computationnel élevé. Les techniques de réduction de modèles émergent comme une approche prometteuse pour atténuer ce défi, visant à réduire la complexité computationnelle tout en maintenant la précision. Parmi ces techniques, la méthode de Décomposition Orthogonale aux valeurs Propres (POD) se distingue comme un moyen efficace de dériver une base réduite dans les systèmes d'écoulement multidimensionnels. Les Modèles d'Ordre Réduit (ROMs) basés sur la POD ont prouvé leur succès dans les réductions de modèles linéaires et faiblement non linéaires monophasiques. Cependant, les ROMs traditionnels, obtenus par POD et projection de Galerkin, rencontrent plusieurs obstacles dans les écoulements multiphasiques, notamment des problèmes d'instabilité, de compatibilité avec la réduction de modèle, des complexités dans la modélisation des corps en mouvement, et des difficultés dans l'implémentation avec des codes commerciaux ne disposant pas d'un accès direct au code source. Ces considérations ont conduit au développement d'une approche non intrusive et Galerkin-free, basée sur la décomposition de domaine et équipée d'informations de capteurs pour prendre en compte les vagues. Ce modèle multi-fidélité intègre la CFD et la POD spatialement. Le solveur haute fidélité est déployé dans le champ proche où les effets visqueux et non linéaires dominent, tandis que le modèle POD ROM est adapté aux régions faiblement non linéaires, concentré sur la propagation des vagues en champ lointain. En exploitant un petit domaine haute fidélité par rapport au domaine original, cette approche permet des réductions significatives des coûts en CPU, tout en préservant la précision. L'échange bidirectionnel d'informations entre les deux modèles est facilité par des régions de chevauchement et des frontières des sous-domaines. La méthodologie de couplage est facilement applicable à diverses simulations impliquant des corps en mouvement, y compris la conversion d'énergie des vagues, permettant une représentation efficace des propriétés multi-échelles. Cette méthodologie démontre une reconstruction précise de l'écoulement et une

description complète de la dynamique du flotteur. Des tests de validation approfondis comprennent à la fois des simulations in-sample, pour des configurations de reproduction, et, plus notamment, des simulations out-of-sample. Ces dernières soulignent la précision et la robustesse de la méthodologie proposée, capable de prédire des solutions pour des paramètres inconnus. L'efficacité de ce modèle hybride permet des simulations intensives, le rendant adapté à un large éventail d'applications, y compris des études paramétriques, des tâches d'optimisation et des simulations multi-objectif. En réduisant considérablement les coûts computationnels, le modèle couplé non seulement accélère les processus d'optimisation et de conception pour les fermes de convertisseurs d'énergie des vagues, mais ouvre également la voie à une évolutivité et une durabilité accrue dans le secteur de l'énergie marine.

Mots-clés : Décomposition orthogonale aux valeurs propres, Énergie marine, Modélisation mathématique, Modèles réduits, Simulations numériques, Modèles multifidélité.

Modellazione multi-scala et multi-fedeltà per convertitori di energia da moto ondoso

Riassunto esteso

Di fronte all'evoluzione del panorama energetico verso soluzioni più sostenibili, il settore marino sta mostrando un crescente interesse nell'energia da moto ondoso come fonte di energia pulita. La distribuzione di convertitori di energia delle onde (WECs) in parchi offre un notevole potenziale per una produzione su vasta scala, ma richiede altresì simulazioni numeriche approfondite, a causa della complessità dell'idrodinamica. La simulazione di parchi di WECs presenta notevoli sfide a causa della loro natura multi-scala, che include la rappresentazione precisa delle interazioni fluido-struttura e tra i WECs, generando effetti sia nel campo vicino che in quello lontano, il quale rappresenta l'influenza più ampia del parco sull'ambiente circostante.

Sebbene i modelli ad alta fedeltà, come la CFD (Computational Fluid Dynamics), siano essenziali per catturare le complessità dei fenomeni non lineari, presentano un costo computazionale elevato. Le tecniche di riduzione di modello emergono

come un approccio promettente per affrontare questa sfida, mirando a ridurre la complessità computazionale mantenendo al contempo la precisione. Tra queste tecniche, la decomposizione ortogonale ai valori propri (POD) si distingue come un metodo efficace per derivare una base ridotta in sistemi di flusso multidimensionale. I modelli a ordine ridotto (ROMs) basati sulla POD hanno dimostrato il loro successo nelle riduzioni di modelli lineari e debolmente non lineari monofase. Tuttavia, i ROM tradizionali, ottenuti attraverso la POD e la proiezione di Galerkin, incontrano diverse difficoltà nei flussi multifase, tra cui problemi di instabilità, compatibilità con la riduzione del modello, complessità nella modellazione dei corpi in movimento e difficoltà nell'implementazione con codici commerciali che non dispongono di accesso diretto al codice sorgente.

Queste considerazioni hanno portato allo sviluppo di un approccio non intrusivo e Galerkin-free, basato sulla decomposizione del dominio e dotato di informazioni da sensori per tenere conto delle onde. Questo modello multi-fedeltà integra CFD e POD spazialmente. Il solver ad alta fedeltà è utilizzato nel campo vicino, dove gli effetti viscosi e non lineari predominano, mentre il modello POD ROM è adattato alle regioni debolmente non lineari, e concentrato sulla propagazione delle onde in campo lontano. Sfruttando un piccolo dominio ad alta fedeltà rispetto al dominio originale, questo approccio consente significative riduzioni dei costi in termini di CPU, preservando al contempo la precisione. Lo scambio bidirezionale di informazioni tra i due modelli è facilitato da regioni di sovrapposizione e confini dei sotto-domini.

La metodologia di accoppiamento è facilmente applicabile a varie simulazioni che coinvolgono corpi in movimento, compresa la conversione di energia delle onde, consentendo una rappresentazione efficiente delle proprietà multi-scala. Questa metodologia dimostra una ricostruzione precisa del flusso e una descrizione completa della dinamica del WEC. I test di validazione approfonditi includono sia simulazioni in-sample, per la riproduzione della soluzione, sia, e soprattutto, simulazioni out-of-sample. Queste ultime evidenziano la precisione e la robustezza della metodologia proposta, in grado di prevedere soluzioni per parametri sconosciuti. L'efficacia di questo modello ibrido consente simulazioni intensive, rendendolo adatto a una vasta gamma di applicazioni, comprese studi parametrici, attività di ottimizzazione e simulazioni multi-obiettivo. Riducendo notevolmente i costi computazionali, il modello accoppiato non solo accelera i processi di ottimizzazione e progettazione per

i parchi di convertitori di energia delle onde, ma apre anche la strada a una maggiore scalabilità e sostenibilità nel settore dell'energia marina.

Parole chiave: Decomposizione ortogonale ai valori propri, Energia marina, Modellazione matematica, Modelli di ordine ridotto, Simulazioni numeriche, Modelli multifedeltà.

Unité de recherche

UMR 5251 Université, 33000 Bordeaux, France.