

AVIS DE SOUTENANCE DE THÈSE

Madame Ziwen WANG est autorisée à présenter ses travaux en vue de l'obtention du diplôme national de DOCTORAT délivré par l'école CENTRALE de MARSEILLE

Le jeudi 31 octobre 2024 à 9h00

Lieu : Salle Amphi 3, Centrale Méditerranée, Amphi 3, 38 rue Frédéric Joliot Curie, 13013, Marseille

Titre : **Simulations des grands tourbillons des sillages de parcs éoliens basées sur la méthode de Boltzmann sur réseau, sous l'influence de la stabilité thermique atmosphérique**

Ecole doctorale : ED 353 - Sciences pour l'Ingénieur : Mécanique, Physique, Micro et Nanoélectronique

Spécialité : Sciences pour l'ingénieur : spécialité Mécanique et Physique des Fluides

Composition du jury :

| | | |
|----------------------|--------------------------|--------------------|
| M. Pierre SGAUT | Aix Marseille Université | Directeur de thèse |
| Mme Sandrine AUBRUN | Ecole Centrale de Nantes | Présidente |
| M. Michel VISONNEAU | CNRS | Rapporteur |
| M. Guillaume BALARAC | Université de Grenoble | Rapporteur |
| M. Frédéric BLONDEL | IFPEN | Examinateur |
| M. Sylvain GUILLOU | Université de Caen | Examinateur |
| M. Mikaël GRONDEAU | Université de Caen | Examinateur |

Résumé (FR)

L'énergie éolienne a connu une croissance rapide ces deux dernières décennies grâce à sa propreté et son faible coût économique. Optimiser les éoliennes et les parcs éoliens est essentiel pour exploiter pleinement cette ressource. Les turbines éoliennes génèrent une forte turbulence et un sillage à faible vitesse, ce qui affecte les turbines en aval et réduit leur production. De plus, l'aérodynamique des éoliennes est influencée par la couche limite atmosphérique (CLA), rendant cruciale l'étude de leur interaction pour optimiser la conception et les performances des parcs éoliens. Les simulations numériques présentent des avantages sur les études expérimentales pour analyser ces interactions. Bien que les simulations de haute fidélité soient précises, leur coût computationnel élevé limite leur utilisation industrielle. La méthode de Boltzmann sur réseau (LBM) offre une alternative efficace, équilibrant coûts et précision. Cette étude combine LBM et simulation des grandes échelles (LES) pour analyser les écoulements de sillage des éoliennes et des parcs éoliens. Les éoliennes sont modélisées avec le modèle de ligne d'actionneur, et les flux de momentum et de chaleur sont représentés par la théorie de Monin-Obukhov. La méthode des tourbillons synthétiques (SEM) est utilisée pour générer la turbulence en entrée. Une validation complète du modèle numérique a été effectuée, intégrant le modèle de ligne d'actionneur dans le solveur LBM-LES, et simulant les écoulements de sillage sous différentes conditions de stabilité atmosphérique et de couche limite neutre (NBL). Les résultats montrent une bonne concordance avec les données de référence, mettant en évidence l'influence de la stabilité thermique sur les caractéristiques du sillage, telles que le déficit de vitesse et le taux de récupération. L'écoulement de sillage se stabilise après un ajustement initial en conditions de température uniforme. Des études

supplémentaires ont été menées sur les sillages des parcs éoliens terrestres et offshore sous l'influence de la stabilité thermique de la CLA. Pour les parcs terrestres, les effets des conditions stables et convectives ont été comparés. Le sillage derrière les deux premières rangées se rétablit plus rapidement en conditions convectives en raison de la turbulence ambiante accrue, tandis que la vitesse du sillage stabilisé est plus élevée en conditions stables, en raison des gradients de vitesse et des contraintes de cisaillement plus importants. Les effets de la stabilité thermique sont à la fois indirects (influence sur la turbulence ambiante et les gradients de vitesse) et directs (impact des forces de flottabilité). Au-delà des deux premières rangées, la rotation des turbines mélange les flux de températures élevées et basses, neutralisant l'écoulement. Pour les parcs éoliens offshore, les simulations montrent que l'écoulement de sillage se stabilise après la deuxième turbine avec une récupération plus lente en raison d'une moindre turbulence d'entrée. La comparaison des résultats des modèles analytiques avec ceux de LES révèle que le modèle PARK surestime la vitesse de sillage derrière la première turbine et sous-estime la vitesse du sillage proche tout en surestimant celle du sillage éloigné. Le modèle NPA sous-estime l'écoulement de sillage derrière la première turbine mais prédit correctement l'équilibre du sillage, bien qu'il surestime l'écoulement devant chaque rangée de turbines en raison de l'absence de prise en compte de l'effet de blocage.

Mots-clés : sillage de parc éolien, stabilité thermique atmosphérique, modèle analytique, modèle de rugosité dynamique, simulation des grandes échelles, méthode de Boltzmann sur réseau

Abstract (EN)

Wind energy has experienced rapid growth over the past two decades due to its inherent cleanliness and low economic cost. Much attention has been focused on optimizing wind turbines and farms to harness the full potential of wind energy. Wind turbines extract energy from airflow, leading to high turbulence and low-velocity wake flows. Downstream turbines in these wakes suffer from increased loads and reduced power production. Additionally, wind turbine aerodynamics are significantly influenced by the atmospheric boundary layer (ABL). Hence, understanding the interaction between wind farms and the ABL is crucial for optimal wind farm design and performance. Numerical simulations offer significant advantages in analyzing wind farm-ABL interactions over experimental studies. Although conventional high-fidelity simulations provide valuable insights into wind farm aerodynamics, their high computational cost limits industrial application. The efficient lattice Boltzmann method (LBM) provides a promising alternative, balancing computational demands and accurate aerodynamic analysis. In this study, LBM was combined with Large Eddy Simulation (LES) to investigate wake flows of wind turbines and farms. Wind turbines were parameterized using the actuator line model, and the ground momentum and thermal flux within the ABL were represented using the Monin-Obukhov similarity theory. Various inflow turbulence generation methods in wind energy were reviewed, with the synthetic eddy method (SEM) used as an alternative to the widely used precursor method. Comprehensive validation of the numerical model was performed, integrating the wind turbine actuator line model into the LBM-LES solver, and simulating individual wind turbine wake flows under atmospheric stability and wind farm wake flows under neutral boundary layer (NBL) conditions. Results showed good agreement with reference data, indicating that wake flow characteristics, such as velocity deficit shape and wake recovery rate, are influenced by thermal stability. Wake flow within a wind farm stabilizes after initial adjustment under uniform temperature conditions. Further studies were conducted on onshore and offshore wind farm wakes influenced by ABL thermal stability. For the onshore wind farm, effects of stable and convective conditions were analyzed. The wake behind the first two rows recovers faster under convective conditions due to higher ambient turbulence, while stabilized wake velocity and turbulence intensity are higher under stable conditions, attributed to larger velocity gradients and increased shear stress. Thermal stability effects include indirect impacts on ambient turbulence and velocity gradients and direct buoyancy force impacts on wake flow behind the first two rows. Beyond this, turbine rotation mixes high and low-temperature flows, neutralizing the wake deeper in the wind farm. Additionally, two analytical models were compared with LES results, highlighting

the importance of considering turbulence intensity. Current empirical models do not adequately represent thermal stability-induced variations in turbulence. Offshore wind farm simulations with constant sea surface roughness showed that wake flow stabilizes after the second turbine, with slower recovery due to lower inflow turbulence compared to onshore farms. Comparisons between analytical models and LES showed the PARK model overpredicts wake flow velocity behind the first turbine but underpredicts near wake velocity and overpredicts far wake velocity from the second turbine onwards, due to low wake recovery rate predictions. The NPA model underpredicts wake flow behind the first turbine but performs well at equilibrium wake flow prediction, overpredicting in front of each turbine row due to not accounting for the blockage effect.

Keywords: wind farm wake, atmospheric thermal stability, analytical model, dynamic roughness model, large eddy simulation, lattice Boltzmann method